MICROMATRICES DE ADN • LOS ANILLOS DE LOS PLANETAS

INVESTIGACION y CIENCIA

ABRIL 2002
5 EURO

Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN

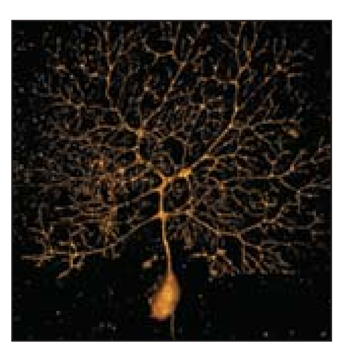




Abril de 2002 Número 307

Edición española de **SCIENTIFIC AMERICAN**

SECCIONES



Portada: Detlef Heck/Fahad Sultan

PROCEDENCIA DE LAS ILUSTRACIONES

Página	Fuente
6	Instituto Cajal, CSIC
7	Detlef Heck/Fahad Sultan
9-10	Thomas Braun/Spektrum der Wissenschaft
11-13	Detlef Heck/Fahad Sultan
17	Scott Grimando
19-20	Xplane (www.xplane.com)
23-26	Pour la Science
27	Archives Lemaître
28	Pour la Science
40-41	Maria Stenzel, *National Geographic Image Collection*
42	John Weinstein, *The Field Museum*
43	Sara Chen
44	Frank Ippolito
45	John J. Flynn y Susana Magallon
46	Maria Stenzel
47	Frank Ippolito
49	Maria Stenzel
50-51	Dennis Galante
53	Jared Schneidman Design
55	Hongyue Dai, *Rosetta Inpharmatics* (*izquierda*); Sara Chen (*derecha*)
56	Jared Schneidman Design
58-59	Don Dixon
61-62	Don Dixon (*dibujos*); NASA/JPL (*imágenes de sonda espacial*)
63-64	Don Dixon
65	Don Dixon (*dibujos*); NASA/JPL (*imágenes de sonda espacial*)
66	Don Dixon (*dibujos*); NASA/JPL (*izquierda*); *Nature*, vol. 400, n.º 6746, 1999: B. Sicardy et al., Telescopio Canadá-Francia-Hawai (*centro*) y C. Dumas et al., Telescopio Espacial Hubble, JPL e Instituto Tecnológico de California (*derecha*)
68-72	Chip Simons
76-79	J. M.ª Rincon y M. Romero
83	Cortesía de ©IMA/photo Philippe Maillard, Museo del Instituto del Mundo Arabe, París
84-85	Bruno Vacaro
88-89	George Retseck (*dibujos*); Universidad de Nueva Orleans y Space Imaging, Inc. (*fotografías*)
96	Sara Chen

COLABORADORES DE ESTE NUMERO

Asesoramiento y traducción:

Francesc Asensi: *El cerebelo*; Juan Pedro Campos: *El universo de Georges Lemaître*; A. Ferrán: *Reptiles y mamíferos del Mesozoico de Madagascar*; Alfonso Susanna: *Micromatrices de ADN*; M.ª Rosa Zapatero: *Los anillos de los planetas*; José Manuel García de la Mora: *Psicología de la adicción a la televisión*; Angel Garcimartín: *Perfiles*; J. Vilardell: *Hace..., Curiosidades de la física* e *Ideas aplicadas*; Luis Bou: *Aventuras problemáticas*

INVESTIGACION Y CIENCIA

DIRECTOR GENERAL José M.ª Valderas Gallardo
DIRECTORA FINANCIERA Pilar Bronchal Garfella
EDICIONES Juan Pedro Campos Gómez
PRODUCCIÓN M.ª Cruz Iglesias Capón
Bernat Peso Infante
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
ADMINISTRACIÓN Victoria Andrés Laiglesia
SUSCRIPCIONES Concepción Orenes Delgado
Olga Blanco Romero
EDITA Prensa Científica, S. A. Muntaner, 339 pral. 1.ª – 08021 Barcelona (España)
Teléfono 93 414 33 44 Telefax 93 414 54 13

SCIENTIFIC AMERICAN

EDITOR IN CHIEF John Rennie
EXECUTIVE EDITOR Mariette DiChristina
MANAGING EDITOR Michelle Press
ASSISTANT MANAGING EDITOR Ricki L. Rusting
NEWS EDITOR Philip M. Yam
SPECIAL PROJECTS EDITOR Gary Stix
SENIOR WRITER W. Wayt Gibbs
EDITORS Mark Alpert, Steven Ashley, Graham P. Collins, Carol Ezzell, Steve Mirsky y George Musser
PRODUCTION EDITOR Richard Hunt
VICE PRESIDENT AND MANAGING DIRECTOR, INTERNATIONAL Charles McCullagh
PRESIDENT AND CHIEF EXECUTIVE OFFICER Gretchen G. Teichgraeber
CHAIRMAN Rolf Grisebach

SUSCRIPCIONES

Prensa Científica S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344
Fax 934 145 413

Precios de suscripción:

	Un año	**Dos años**
España	55,00 euro	100,00 euro
Extranjero	80,00 euro	150,00 euro

Ejemplares sueltos:

Ordinario: 5,00 euro
Extraordinario: 6,01 euro

—El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.

DISTRIBUCION

para España:

LOGISTA, S. A.
Aragoneses, 18 (Pol. Ind. Alcobendas)
28108 Alcobendas (Madrid)
Tel. 914 843 900

para los restantes países:

Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª – 08021 Barcelona
Teléfono 934 143 344

PUBLICIDAD

GM Publicidad
Francisca Martínez Soriano
Menorca, 8, semisótano, centro, izquierda.
28009 Madrid
Tel. 914 097 045 – Fax 914 097 046

Cataluña y Baleares:
Sergio Munill
Valencia, 58 entlo. 2.ª
08015 Barcelona
Tel. y fax (34) 932 263 624

Difusión controlada ojd

ISSN 0210136X Dep. legal: B. 38.999 – 76

Filmación y fotocromos reproducidos por Dos Digital, Zamora, 46-48, 6ª planta, 3ª puerta - 08005 Barcelona
Imprime Rotocayfo-Quebecor, S.A. Ctra. de Caldes, km 3 - 08130 Santa Perpètua de Mogoda (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España

HACE...

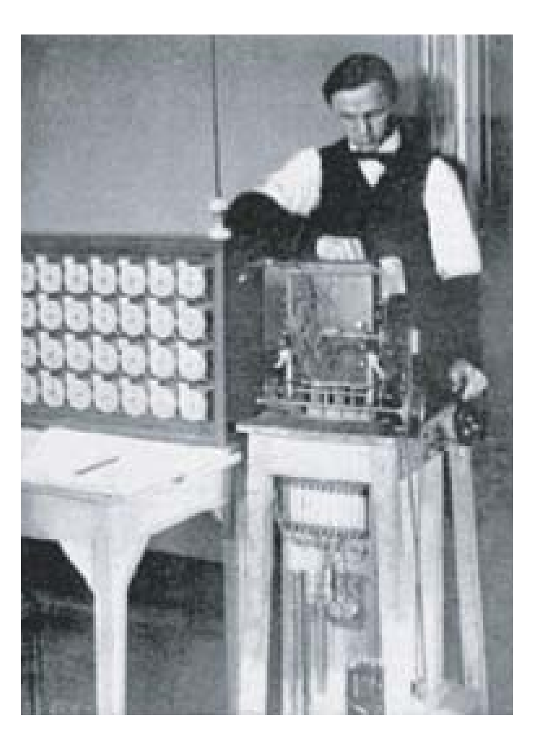
...cincuenta años

LA ERA DE LOS ANTIBIÓTICOS. «Aunque ya se hayan descubierto más de 300 sustancias antibióticas, sólo cinco (penicilina, estreptomicina, cloromicetina, aureomicina y terramicina) han conseguido la categoría de fármacos consagrados. Otro grupo tiene aplicaciones importantes, aunque limitadas, o que se consideran prometedoras. Todos los demás antibióticos, por una u otra causa, no han cumplido las expectativas. Unos son demasiado débiles; otros actúan sólo en los tubos de ensayo o en animales subhumanos; la mayoría son excesivamente tóxicos. Por supuesto, la búsqueda de nuevas medicinas 'milagrosas' prosigue con fervor infatigable. El campo de investigación es muy amplio. Apenas queda una zona en el reino vegetal que no haya dado sustancias antibióticas. Han salido de simientes, líquenes, muchos grupos de hongos, actinomicetos y bacterias.»

...cien años

ALIMENTOS FRESCOS EN INVIERNO. «A sabiendas, la ciencia ha desafiado todas las leyes que rigen el cultivo estacional; el conflicto se ha resuelto con un gran triunfo para el hombre. En la franja de los estados sureños, donde el clima es lo bastante cálido para los cultivos al aire libre, la horticultura y la agricultura de invierno se han extendido con una fenomenal rapidez en los últimos años. Esta industria ha transformado por completo nuestro sistema de vida y alimentación; durante el invierno estamos abastecidos de frutas y verduras casi tan abundantemente como en verano. La expansión se ha debido a las compañías ferroviarias y navieras que explotan líneas costeras o atraviesan la franja sureña. Durante el invierno se dedican a ese tráfico más de 60.000 vehículos frigoríficos.»

PRECURSOR DEL ORDENADOR. «El sistema Hollerith de perforado y tabulación mecánicos se concibió para el censo anterior (el undécimo). Pero el sistema ha sido perfeccionado y ampliado notablemente para satisfacer las actuales y crecidas exigencias del duodécimo censo. Los dos elementos más importantes del sistema son, primero, la tarjeta perforada y, segundo, un medio que traslada mecánicamente lo inscrito en ella a unos registros listados que suman las unidades que contenga (*ilustración*). El último avance del sistema es que el trabajo de colocar por separado cada tarjeta bajo la caja de palpadores, abatir ésta y retirar la tarjeta ya no se hace a mano, sino que se encarga de él automáticamente una máquina. Si en la partida hay presente una tarjeta mal perforada o deformada, será automáticamente expulsada.» [*Nota de la redacción: la Compañía de Máquinas Tabuladoras de Herman Hollerith acabó siendo IBM.*]



Tabulador de tarjetas por el sistema Hollerith, año 1902

EL SABOR DEL DINERO. «Según el conde Gleichen en su 'Misión a Menelik', el pueblo abisinio emplea los táleros de María Teresa de 1780. Pero como dinero menudo se valen de una moneda muy distinta: barras macizas de sal cristalizada, de unos 25 centímetros de largo y con la punta levemente ahusada. Cinco de esas barras valen por un tálero. La gente es muy exigente acerca de los niveles de pureza de la moneda. Si no suena como un metal al ser golpeada con la uña, o si se agrieta o mella, no la aceptan. Es una muestra de afecto, cuando unos amigos se encuentran, intercambiar lamidas de sus respectivas *amolis* (barras), práctica que disminuye el valor de éstas.»

...ciento cincuenta años

EL DOCTOR LIVINGSTONE EN AFRICA. «El señor Leavitt leyó ante la Sociedad Geográfica Americana un interesante informe del reverendo señor Livingstone (David Livingstone), misionero en Africa del Sur. El reverendo caballero había hecho dos excursiones a las regiones del centro del continente. En los mapas mostrados se aprecia que a 1100 kilómetros del océano el brazo occidental del Zambeze recibe al Chobe, el mayor de sus afluentes, sin que hasta ahora se conozcan las fuentes de esos ríos. Los tratantes de esclavos portugueses empiezan a extender en la zona sus actividades, pero no por sí mismos, sino con la mediación de las tribus negras que están a su servicio. Hará unos dos años que algunos tratantes bien provistos de telas, armas, etc., de fabricación inglesa entraron en la región del Chobe, pero la gente de allá no se mostró propicia al negocio.»

EL CEREBELO

El cerebelo, que coordina los movimientos delicados, interviene en la audición de las palabras y en otras actividades psíquicas. La disposición geométrica de sus neuronas le permite reconocer mínimas diferencias de tiempo entre las señales que le llegan

Detlef Heck y Fahad Sultan

La decisión ha de tomarse en una fracción de segundo. De repente el jugador atrapa la pelota, se retuerce, da dos cortos pasos y la envía a la red. Con toda razón admiramos a los grandes deportistas y a otros virtuosos que dominan magistralmente los movimientos, sean pilotos de carreras, artistas o mecanógrafos. No caemos en la cuenta, sin embargo, de que muchas veces al día todos realizamos movimientos de una precisión equiparable.

En el momento en que un jugador de baloncesto lanza la pelota, tiene que coordinar la contracción de más de seiscientos músculos: su cerebro procesa con rapidez vertiginosa la información que le llega de los órganos sensoriales, incluidos los que determinan la posición corporal y el tono muscular. Inmediatamente decide la actividad muscular a ejecutar. Para conseguir que su organismo realice de forma impecable un trabajo tan complejo, el deportista debe ejercitarse largos años. Con el entrenamiento, las distintas partes del sistema nervioso que intervienen, adquieren un grado creciente de coordinación.

El cerebelo desempeña una función decisiva. Se sabe desde hace tiempo que las lesiones de esta parte del encéfalo dificultan, si no impiden, los movimientos delicados. La ciencia ha descubierto funciones todavía más complejas donde podría participar el cerebelo: desde ciertas actividades psíquicas hasta la percepción y la competencia en el lenguaje.

Empezamos a conocer de qué modo el cerebelo lleva a cabo tales funciones y en qué estriba su participación. A diferencia de otros integrantes del sistema nervioso central, el cerebelo presenta una estructura de regularidad extraordinaria. Consta de varios tipos de neuronas que divergen en aspecto y función. Las conexiones entre neuronas siguen un patrón estrictamente geométrico, propio, diríase, de un circuito electrónico. Se supone que en esta estructura radica la clave de la función que el cerebelo desempeña en el conjunto del sistema nervioso central. Como nosotros mismos hemos podido comprobar, gracias a esa rígida estructura el cerebelo reconoce señales que le llegan en celerísima sucesión. Permite con ello que el cuerpo no sólo realice movimientos rápidos y perfectamente coordinados, sino también que capte determinados estímulos (reconocimiento del habla, por ejemplo). Estos ensayos confirman un modelo propuesto por nuestro grupo de trabajo según el cual las señales que llegan al cerebelo lo atraviesan a la manera de una ola mareal, una "onda de flujo" en nuestra denominación.

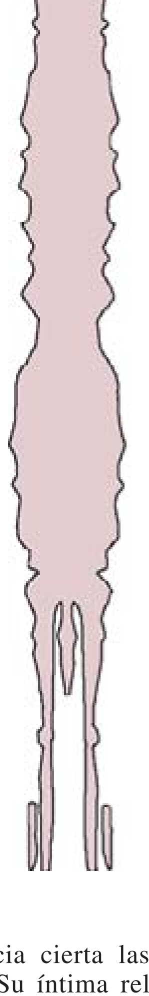
El primero que describió la importancia del cerebelo en la coordinación de movimientos, en particular de los muy complejos, fue Gordon Holmes en 1917. Este neurólogo inglés estudió soldados que sufrían lesiones cerebelo-



1. REPRESENTACION de las células cerebelosas, tomada de Ramón y Cajal (1911).



2. EN LA VISTA POSTERIOR del encéfalo se aprecia el estrecho plegamiento del cerebelo. Si se desplegara resultaría una cinta de dos metros de longitud.



sas. El armamento y los proyectiles empleados en la Primera Guerra Mundial conseguían una gran velocidad de impacto y provocaban unas lesiones con trayectos "limpios", bastante bien definidos. Muchos heridos sobrevivieron a sus lesiones. Holmes observó que quedaban lastrados: se veían incapaces de realizar las más sencillas tareas cotidianas. Todo lo hacían de forma incoordinada, como si fueran infantes. Cualquier movimiento resultaba brusco, a pesar de que los afectados no padecían ningún tipo de parálisis, ni sufrían trastorno psíquico alguno.

No lograban siquiera la coordinación de los movimientos más simples; por ejemplo, llevarse el dedo índice a la punta de la nariz, incluso con los ojos abiertos. Tenían gran dificultad para asir una taza de té. La mano llegaba o demasiado pronto o demasiado tarde, con frecuencia chocaba con la taza y la tiraba. A esa falta de coordinación los médicos la llaman "ataxia". En algunos casos les temblaban las extremidades cuando pretendían realizar movimientos intencionados; verbigracia, aprehender un objeto. Lo peor era que este "temblor de intención" se hacía tanto más intenso cuanto más se aproximaba la mano al objetivo. En algunos afectados la mano iba de un lado a otro; les resultaba imposible asirlo.

Al principio de la evolución biológica el cerebelo (del latín *cerebellum*, "cerebro pequeño") cubría probablemente otras funciones. Representa un área muy antigua del encéfalo. Se encontraba ya en los primeros vertebrados. La lamprea, un animal arcaico con forma de anguila, presenta un cerebelo primitivo que se manifiesta como una suerte de protuberancia del cerebro. En esta estructura llama la atención la presencia de unas fibras paralelas que unen las dos mitades del encéfalo, hebras características de nuestro cerebelo. En el caso de la lamprea se trata de una cinta corta y estrecha. No conocemos a ciencia cierta las funciones de este cerebelo primitivo. Su íntima relación con los centros del equilibrio situados en el tronco del encéfalo sugiere una participación en el mantenimiento del equilibrio. Probablemente, los movimientos y los cambios de presión del agua puedan ser percibidos por los peces a través de un órgano sensorial específico situado en los costados del cuerpo. Con el tiempo la evolución ha ido formando cerebelos de formas y tamaños muy diversos. Sin embargo, resulta sorprendente que, salvo contadas excepciones, la estructura íntima —el patrón en que se hallan ordenadas las neuronas y sus interconexiones— sigue siendo la misma.

Comparadas con las del cerebro, las características del cerebelo resultan sorprendentes. Conviene subrayar que el tamaño de uno y otro ha corrido un curso evolutivo paralelo. También en el desarrollo del individuo maduran a la vez. De la intrínseca relación de

ambas estructuras dan fe los millones de fibrillas a través de las cuales se hallan interconectados. La mayoría de las señales que llegan al cerebelo proceden del cerebro, a través de un grueso paquete de fibras situado en el tronco encefálico. En reciprocidad, el cerebelo envía muchas señales propias al cerebro.

Más neuronas que el cerebro

Pese a todo, no es fácil hallar dos estructuras más dispares. En la corteza cerebral los pliegues y los surcos se disponen de un modo intrincado en todas las direcciones. En la corteza del cerebelo los pliegues discurren en la misma dirección, de forma transversa al eje longitudinal del cuerpo. La corteza cerebral alcanza un grosor de varios milímetros; la del cerebelo, unas décimas de milímetro.

En la capa cortical, constituida por la "sustancia gris", residen las neuronas en un caso y en el otro. También se generan aquí las "sinapsis", puntos de contacto a través de los cuales las neuronas reciben las señales transmitidas vía las ramificaciones dendríticas de otras. Por debajo de la corteza se encuentra la "sustancia blanca", formada por largas prolongaciones de las neuronas —los "axones"— mediante las cuales envían señales a distancia. Para conseguir una más rápida transmisión de las señales eléctricas, tales prolongaciones están rodeadas por unas células especiales; ésa es la explicación de que en las preparaciones anatómicas presenten un aspecto claro. En el cerebro los axones adquieren un volumen enorme y conectan entre sí diversas regiones. El cerebelo presenta, por contra, una sustancia blanca claramente menor. Sus axones envían señales casi exclusivamente a otras partes del encéfalo, sobre todo al cerebro.

Sólo en volumen (una sexta parte) el cerebelo es inferior al cerebro. Extendida, su superficie representa aproximadamente la de un hemisferio cerebral. Si desplegamos uno de estos hemisferios adoptará la figura de un trapo irregular, con dimensiones similares en todos los sentidos y un diámetro de unos treinta centímetros. En cambio, la superficie del cerebelo supondría una estrecha cinta de casi dos metros y medio de longitud.

Pero el número de neuronas del cerebelo quintuplica las del cerebro: unos cien mil millones frente a veinte mil millones. Si se toma el número de neuronas y la extensión de la superficie como parámetro de la capacidad de procesar información, habrá que admitir que el cerebelo cumple unas misiones diferentes, aunque del mismo nivel de complejidad, que el cerebro. Recientes investigaciones lo confirman.

Hace unos cien años Santiago Ramón y Cajal (1852-1934) aportaba la primera descripción exacta de cada uno de los tipos de células que se encuentran en el cerebelo; mostraba, asimismo, la disposición estratificada de las células y de las fibras en la corteza cerebelosa. Refinó hasta tal punto nuevos métodos de tinción, que pudo representar células completas del sistema nervioso central, incluidas sus prolongaciones, con un detalle jamás visto hasta entonces. Los tipos celulares que identificó en el cerebelo y los nombres que les dio conservan toda su vigencia.

Ramón y Cajal vio que en la corteza cerebelosa se distinguen ópticamente tres capas. La capa interior y la media están formadas por apretados cuerpos celulares, mientras que la externa contiene las prolongaciones de las neuronas repletas de sinapsis, a través de las cuales se transmiten las señales. En esta capa externa, denominada "capa molecular" por su apariencia estructural homogénea en las tinciones histológicas clásicas, tienen lugar las funciones fundamentales del cerebelo. Aquí, como si se tratara de un patrón hístico tridimensional, las ramificaciones nerviosas se hallan en íntima interrelación.

Reparto de funciones entre las neuronas

En cada una de estas tres capas hay tipos celulares de tamaño, forma y especie peculiares. En su vinculación conjunta, cada tipo se ocupa de una tarea determinada. Las células mayores y más impresionantes son las "células de Purkinje", denominadas así en honor de Johannes E. Purkinje (1787-1869). Sus grandes cuerpos celulares se ordenan en fila rigurosa, distantes entre sí unas cincuenta micras. Esa serie se sitúa en la parte más interna de la capa media. Las células de Purkinje son las únicas neuronas de la corteza cerebelosa que, a través de sus largas prolongaciones, envían señales hacia el interior del cerebelo; desde allí se retransmiten, entre otros destinos, al cerebro, en particular a la corteza motora, sede donde se emiten las órdenes motoras. Significa ello que las células de Purkinje constituyen las únicas neuronas eferentes del cerebelo que mandan los resultados de su procesamiento informativo a otras partes del encéfalo.

Para la recepción de señales cada célula de Purkinje dispone de un gran árbol dendrítico plano, o

Resumen/El cerebelo

- **El problema**. En la corteza cerebelosa las neuronas se disponen en fila, encadenadas. Sus prolongaciones se sitúan perpendiculares entre sí. Valiéndose de este patrón tan estrictamente imbricado, ¿cómo dirige el cerebelo los movimientos?
- **La tesis**. Las señales que llegan a la corteza cerebelosa deben dar lugar a una onda común de estímulos, una "onda de flujo". Sólo entonces se envía el mensaje al cerebro.
- **La solución propuesta**. Debido a la separación geométrica entre contactos celulares estimuladores e inhibidores la corteza cerebelosa está formada por varios miles de "franjas". En cada segmento de franja se desarrolla la coordinación de un determinado patrón motor, adecuado a una situación concreta. Unicamente las señales que rigen movimientos coordinados se retransmiten al cerebro.

Células de la corteza cerebelosa

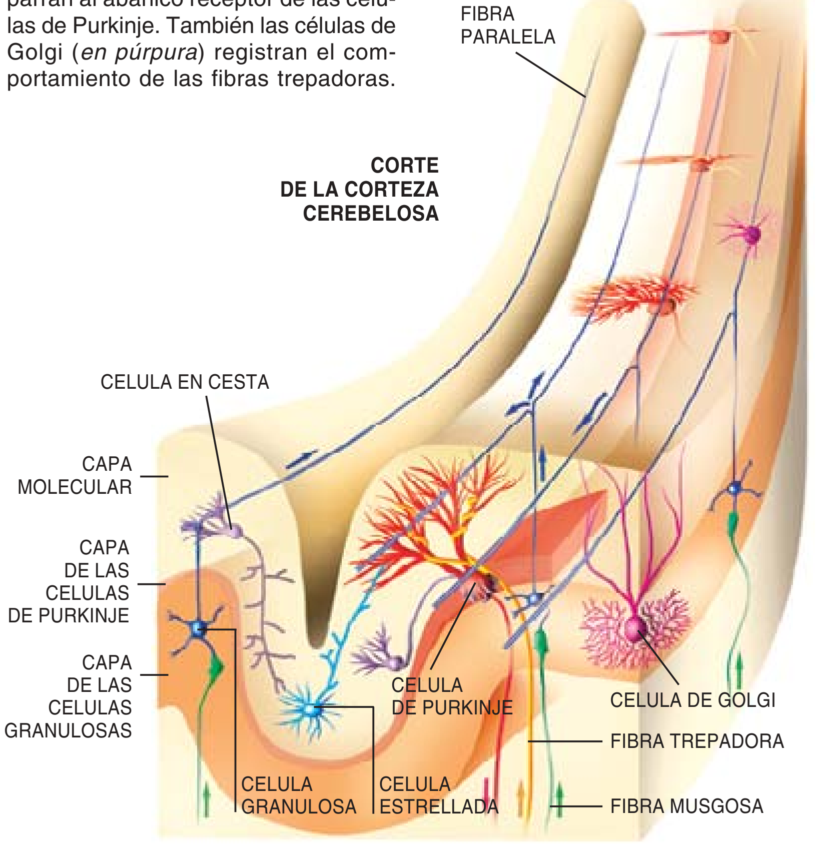
Tipos celulares y sus funciones específicas

El patrón que siguen las conexiones que enlazan las neuronas de la corteza cerebelosa, dispuestas en ángulo recto, constituye el sustrato para el gobierno de los movimientos de precisión.

Aparecen varios tipos de neuronas. Las células granulosas (*en azul*) representan la "estación de entrada" para las señales procedentes del exterior. Residen en la capa más profunda de la corteza (*en castaño*) y, con una densidad de 2,7 millones por milímetro cúbico, representan las neuronas más abundantes del encéfalo. Las señales aferentes les llegan a través de las fibras musgosas (*en verde*), cuyo cuerpo celular se encuentra en el tronco del encéfalo.

Las células granulosas transmiten su información mediante fibras paralelas (*en azul*). De cada célula surge una prolongación eferente hasta la capa externa de la corteza (*en gris*) donde se bifurca en dos ramas de varios milímetros de longitud formando un ángulo recto. Tales fibras, muy apretadas, atraviesan las antenas receptoras desplegadas en un plano perpendicular que emergen de las grandes células de Purkinje (*en rojo*); constituyen éstas el "punto de salida" de la corteza cerebelosa. Después de alguna estación intermedia, dichas células envían sus mensajes al cerebro. A través de las fibras paralelas reciben señales que aumentan su actividad. Por el contrario, las células estrelladas (*en azul claro*) y las células en cesta (*en lila*), variantes del mismo tipo celular, establecen contactos con las células de Purkinje a través de los cuales inhiben su actividad. También sus antenas receptoras corren perpendiculares a las fibras paralelas cuyos estímulos registran. De esta forma, entre todos los mensajes que a través de las "vías" o las "franjas" de fibras paralelas llegan a las células de Purkinje, quedan regulados los que aportan alguna utilidad.

Para controlar las células de Purkinje, y en realidad para aprender, sirven también las fibras trepadoras (*en amarillo*); desde el tronco del encéfalo llegan a la corteza cerebelosa y se emparran al abanico receptor de las células de Purkinje. También las células de Golgi (*en púrpura*) registran el comportamiento de las fibras trepadoras. Estas últimas distribuyen sus antenas en la capa externa, aunque no en un plano, sino en las tres dimensiones del espacio formando una especie de esfera. Las prolongaciones de las células de Golgi se ramifican entre las células granulosas y les transmiten una señal inhibidora. Se les atribuye la misión de procurar que la actividad general de la capa externa de la corteza cerebelosa no sea excesiva.



mejor dicho, de un abanico dendrítico. Con sus numerosas sinapsis estos abanicos se compactan en la parte más externa de la corteza, unos a continuación de otros, pero todos en la misma dirección transversal a los pliegues de la corteza cerebelosa. Cada abanico, de un grosor de una centésima de milímetro, abarca una superficie aproximada de una décima de milímetro cuadrado. Para las señales aferentes ofrecen de cien mil a doscientos mil contactos sinápticos, cifra extraordinariamente alta incluso para las neuronas del sistema nervioso central. Esto supone un número de sinapsis veinte veces superior al de las neuronas típicas de la corteza cerebral. Cada célula de Purkinje recibe veinte veces más información que las neuronas de la corteza del cerebro.

A las células de Purkinje les llega la mayoría de señales desde las "células granulares", instaladas en la más interna de las tres capas. La "capa granular" aparece repleta de estas células pequeñas que envían prolongaciones a la capa externa, donde se bifurcan en forma de T. Las dos ramas corren paralelas a los surcos del cerebelo, en un trayecto de dos o tres milímetros; atraviesan, pues, los abanicos de varios centenares de células de Purkinje. Dichas fibras transversales, denominadas "fibras paralelas", constituyen las estructuras más singulares del cerebelo. Se aprietan en una densidad tal, que en un corte transversal de un milímetro cuadrado hallaríamos seis millones de fibras. A su disposición paralela se debe que los pliegues del cerebelo vayan todos en la

Modelo funcional de un detector de secuencias

“Ondas de flujo”: garantía para movimientos suaves

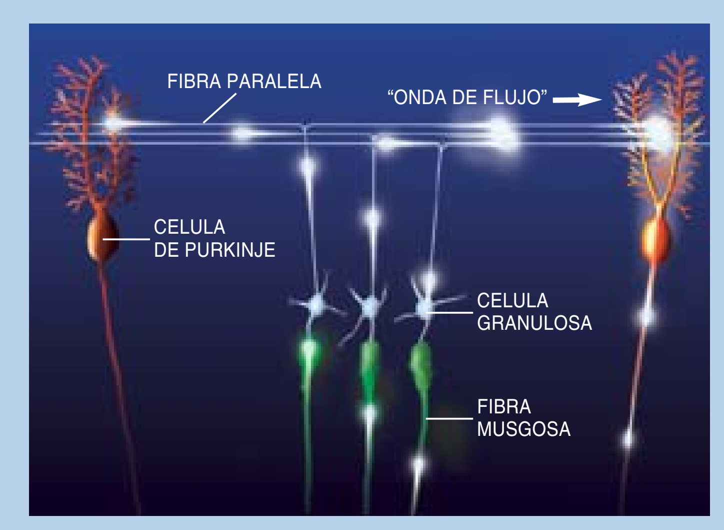
¿Cómo consiguen las células del cerebelo que se realicen movimientos rápidos, precisos y coordinados?

En la corteza cerebelosa, corresponde a las células de Purkinje (*en rojo*) enviar señales al cerebro. Deben ser “excitadas” cuando en una situación dada ha de tener éxito un determinado movimiento. En ese momento, sus grandes abanicos de antenas se ven invadidos por una andanada de señales estimuladoras vehiculadas por las fibras paralelas.

Las señales estimuladoras proceden también de las células granulares (*en azul*) vecinas. Para que las señales transcurran sincrónicamente por las fibras paralelas en forma de “ondas de flujo” y lleguen al mismo tiempo a las células de Purkinje, se requiere que las distintas células granulosas reciban un estímulo desde el exterior, siguiendo un patrón a tenor del cual arriben primero las más lejanas y, luego, las más cercanas.

Mediante una suerte de “aprendizaje” el cerebelo permite sólo combinaciones muy concretas de señales. Reconoce secuencias específicas de señales formadas por una multitud de informaciones. Se incluyen señales sensoriales sobre la postura del cuerpo y su situación en el espacio en un momento dado, así como sobre los procesos motores que se están llevando a cabo en el cerebro.

A buen seguro, la corteza cerebelosa “codifica”, localizándolas meticulosamente en su superficie, nuestras infinitas posibilidades motoras.



Una “onda de flujo” encuentra la célula de Purkinje adecuada.

misma dirección, que no es otra que la de las fibras paralelas.

El principio de las conexiones entre las células granulosas y las de Purkinje está muy claro: las células granulosas reciben señales del exterior del cerebelo y, por su parte, pueden estimular las células de Purkinje a través de múltiples sinapsis. Cuando éstas se excitan, envían las señales fuera de la corteza cerebelosa.

Sin embargo, el resultado final viene determinado por otras células. En la capa externa hay unas anodinas que forman también una especie de abanicos, pero mucho menos fijos. Estos árboles dendríticos se sitúan transversales a los surcos, dibujando un ángulo recto con las fibras paralelas. A través de sus axones, estas neuronas establecen también sinapsis con las células de Purkinje. Pero envían señales inhibidoras, que bloquean la actividad de las células receptoras. Ello significa que la célula de Purkinje obtendrá un resultado final a partir de los múltiples mensajes que le llegan, en parte estimuladores y en parte inhibidores.

Las células granulosas reciben también señales inhibidoras a través de otras advertidoras. Probablemente esto impida que la actividad general de la capa externa no se vea sobreexcitada. Por otro lado, estas neuronas inhibidoras, denominadas células de Golgi, constituyen una excepción en el patrón de las neuronas cerebelosas que se caracteriza por extender sus ramificaciones en dos dimensiones.

En el procesamiento de la información desempeñan una función muy importante las “fibras trepadoras”. Ascienden desde el tronco del encéfalo y se emparran estrechamente a las células de Purkinje. Ese movimiento trepador se produce cuando la célula de Purkinje entra en una fase de actividad excesiva. Las fibras trepadoras, por utilizar una imagen, son el maestro que reprende al alumno. Intervienen, al parecer, cuando el cerebelo ha aprendido ya a dirigir un determinado movimiento.

Patrón de estímulos con limitaciones locales

El principio fundamental de la ordenación celular de la corteza cerebelosa resulta evidente. En la capa más externa, donde numerosas neuronas establecen contacto mutuo, existen dos direcciones privilegiadas para las vías eferentes: paralelas a los pliegues o siguiendo un plano perpendicular a las primeras. Los axones que optan por un curso paralelo, es decir, las “fibras paralelas”, son portadoras de señales estimuladoras; las otras lo son de señales inhibidoras. ¿Qué tiene que ver esta disposición precisa, de geometría casi exacta, con las funciones del cerebelo? ¿Qué se esconde tras la disposición de los elementos estimuladores e inhibidores?

Los autores

DETLEF HECK y FAHAD SULTAN se doctoraron en la Universidad de Tubinga con sendos trabajos sobre el cerebelo. Heck dirige un grupo de investigación en la facultad de biología de la Universidad de Friburgo. Sultan se halla adscrito al departamento de neurología cognitiva de la facultad de medicina de la Universidad de Tubinga.

Al contrario de lo que sucede en el cerebelo, en la corteza cerebral no se observa, salvo contadas excepciones, ni una dirección preferente de las fibras ni una diferenciación geométrica entre fibras estimuladoras e inhibidoras. Antes bien, caracterizan a esta red los enlaces retrógrados, que conectan aleatoriamente grupos de neuronas que se estimulan entre sí de forma oscilante. Con esto el cerebro puede activarse a sí mismo sin requerir estímulos procedentes del exterior.

No hay en el cerebelo ninguna oscilación de este tipo. Entre sus neuronas, sólo las células granulosas envían estímulos a través de sinapsis con las fibras paralelas. Todo el resto de tipos celulares emiten señales inhibidoras. Puesto que el cerebelo no puede ni generar ni mantener por sí mismo estímulos, para su activación depende por entero de otras zonas del encéfalo. Sólo reacciona, pues, ante la llegada de señales desde el exterior.

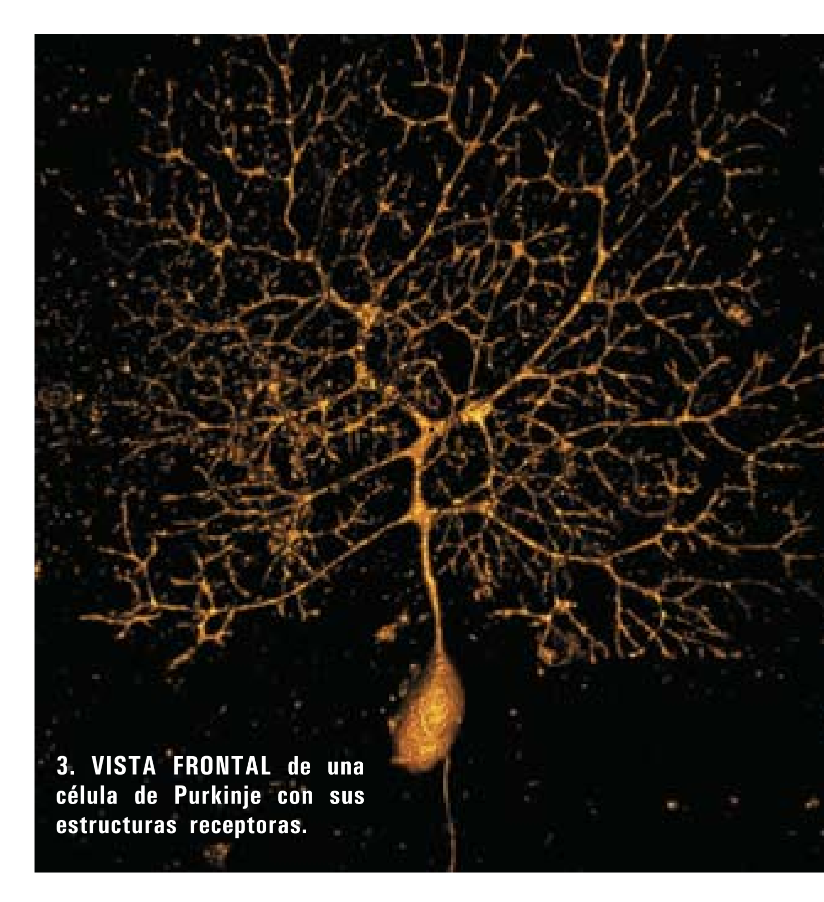
El cerebelo posee otra particularidad. Cualquier información que recibe se procesa en un área muy restringida. Las fibras más largas, las paralelas, son muy cortas en el cerebelo; miden pocos milímetros. Por ello, la información, a diferencia de lo que ocurre en el cerebro, se queda prácticamente en el sitio. En concreto, cada célula de Purkinje recibe sólo la influencia de las células granulosas situadas a pocos milímetros de distancia. En el cerebro la mayor parte del intercambio de información se realiza a distancias mucho mayores, incluso entre ambos hemisferios cerebrales.

Perfección mediante las ondas de flujo

En nuestra opinión, tal limitación espacial es lo que posibilita que el cerebelo cumpla sus especiales funciones. Ya en 1958 Valentin Braitenberg, director entonces del Instituto Max Plank de Biología Cibernética de Tubinga, propuso un modelo funcional que nosotros hemos confirmado en ensayos experimentales recientes. Braitenberg denominó a su modelo "teoría cerebelar de las ondas de flujo". Muchos de los resultados aquí presentados los obtuvimos durante nuestra estancia en su Instituto.

De acuerdo con la idea de Braitenberg, a todo patrón de movimiento fino ya ensayado corresponde una determinada área del cerebelo. En esa parcela restringida, a través de un apretado haz de fibras paralelas, una onda de señales impacta en las células de Purkinje que halla en su trayectoria. La onda de señales supera esa estación de partida en el cerebelo e informa al resto del encéfalo. Quiere ello decir que, sólo cuando todas las señales aferentes están acompasadas y crean así un flujo de ondas, proporcionan la adecuada información a las células de Purkinje. De acuerdo con esa hipótesis, las señales que llegan desde el exterior a través de dos o más células granulosas consecutivas deben transmitirse siguiendo una secuencia temporal exacta; de suerte tal, que, al final, el estímulo propagado por sus axones (las fibras paralelas) alcance la misma altura. Expresado de otra forma: para conseguir un movimiento fino, dos células granulosas vecinas han de excitarse con un intervalo de tiempo exactamente igual al que necesita una señal para propagarse por una fibra paralela entre una y otra. Hay en ello la ventaja de que las señales se propagan por las fibras paralelas a una velocidad particularmente pequeña. Sólo cuando muchas células granulosas son estimuladas de ese modo se desencadena una onda de flujo de señales.

¿Para qué sirven las ondas de flujo? Los centros motores de la corteza cerebral que rigen la coordinación de la musculatura intervienen con parsimonia en los movimientos que se están realizando en un momento dado. Para cada paso necesitan recibir constantemente información procedente de la situación corporal y de los órganos de los sentidos; y eso requiere tiempo. La corteza cerebral por sí sola no puede gobernar con suficiente rapidez los movimientos instantáneos, finos, automáticos. Para ello necesita la ayuda del cerebelo. Según Braitenberg, el cerebelo reconoce, en pocos milisegundos, complejos especí-



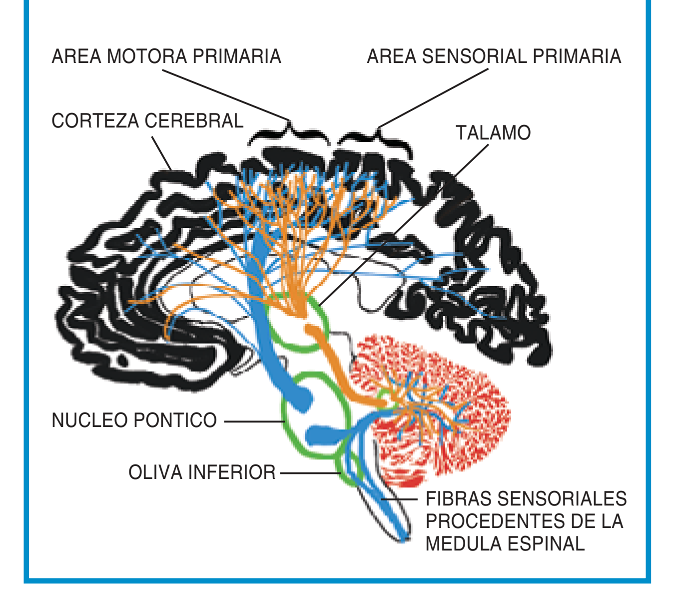
3. VISTA FRONTAL de una célula de Purkinje con sus estructuras receptoras.

ficos formados por múltiples señales que le llegan a través de las células granulosas. Sólo cuando las señales están acompasadas en el tiempo de una forma determinada puede desencadenarse una onda de flujo. Estas señales proceden de los órganos sensoriales de todo el cuerpo, es decir, entre otros, del aparato motor, de los ojos, de los oídos y del sistema del equilibrio, así como del cerebro. Por así decirlo, las ondas de flujo son expresión de la muestra secuencial incidente, adecuada para el cerebelo. Así pues, el cerebelo representa un detector de secuencias para el patrón temporal en estos complejos de señales.

Las células de Purkinje, que envían señales a los centros motores del cerebro, se excitan tanto más cuanto mayor sea el número de fibras paralelas que las espolean simultáneamente. Y eso es lo que sucede a través de una onda de flujo. Con sus abanicos de dendritas extendidos de forma perpendicular a las fibras paralelas, las células de Purkinje pueden captar en una mínima fracción de segundo una ola de flujo que las atraviese. Lo mismo puede decirse de los abanicos de dendritas desplegados por otros tipos de células que contribuyen a procesar la información.

Conexiones con el cerebro

El cerebelo (*en rojo*) establece conexiones con muchas áreas del cerebro (*en negro*). La mayor parte de la información la recibe de las áreas motoras del cerebro y de las zonas donde llega información de los órganos de los sentidos (*conexiones azules*). Aquí es donde también envía los resultados del procesamiento de la información de que dispone (*conexiones amarillas*). Según han descubierto recientes investigaciones de la conducta, el cerebelo mantiene relación, además, con las áreas anteriores y otras zonas asociativas del cerebro.



La teoría de las ondas de flujo se basa en particularidades anatómicas ya conocidas. Sin embargo, nadie sabía si en la corteza cerebelosa se daba este tipo de ondas, es decir, si operaba en realidad el hipotético "detector de secuencias".

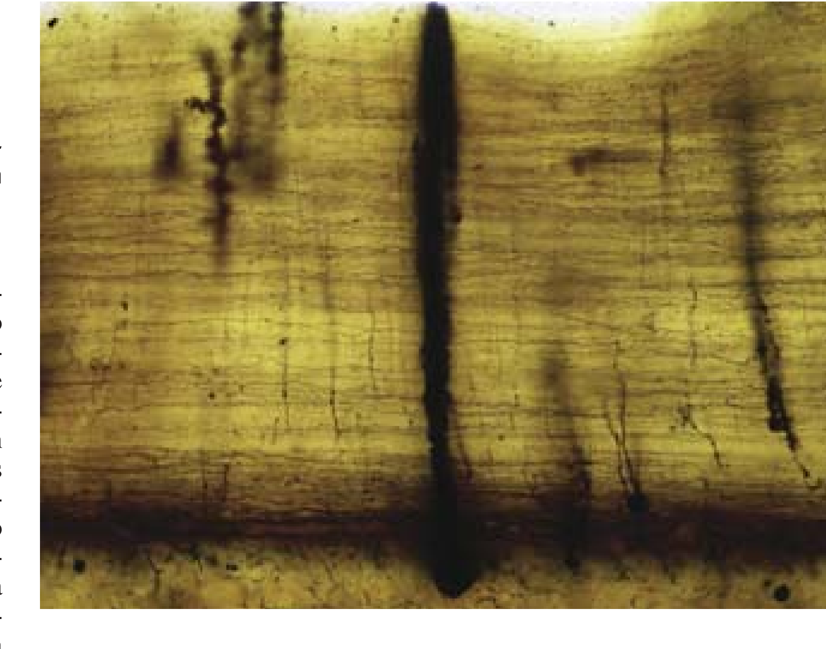
Abordamos la cuestión en las ratas. En preparados de corteza cerebelosa mantenidos en un medio nutritivo, intentamos provocar pequeñas ondas de flujo artificiales mediante la aplicación de estímulos eléctricos a través de electrodos. Con ese propósito construimos un "peine" con "púas" de hilo metálico. A través de estas púas enviábamos breves y débiles impulsos eléctricos a las células granulosas subyacentes, como si fueran estimuladas por señales neuronales de origen diverso.

Variamos el ritmo de estos impulsos eléctricos manteniendo constante su número. Unas veces acelerábamos los impulsos; otras, enlentecíamos el paso del "peine". Ensayamos incluso la inversión del sentido del desplazamiento o provocábamos estímulos distribuidos al azar.

Los resultados del experimento corroboraron los predichos de acuerdo con la teoría de las ondas de flujo. Las células granulosas debían estimularse una tras otra, con celeridad suficiente para que las fibras paralelas pudieran transmitir las señales. Los estímulos se transmitían de forma sincrónica a través de las fibras. Se debilitaba la actividad global de un área en un determinado tiempo si la frecuencia de los estímulos era mayor o menor que el ritmo ideal. Y seguía siendo débil si los estímulos del peine se realizaban al azar. Por su parte, las células de Purkinje emitían las mejores señales cuando las fibras paralelas actuaban en sincronía sobre su abanico receptor. Más tarde llegamos a las mismas conclusiones en animales narcotizados.

Jugadores de béisbol, artistas del trapecio, pianistas y corredores deben su virtuosismo a las ondas de flujo. En última instancia, todos les debemos nuestra actividad motora. Nuestro cerebelo responde de la precisión y suavidad de los movimientos complejos. Entre éstos hemos de incluir los de las manos, sencillos sólo en apariencia. La mera aprehensión de un bolígrafo requiere la delicada contracción coordinada de muchos músculos de la mano y del brazo, siguiendo un plan cronológico flexible capaz de adaptarse a la situación. Para su cabal desarrollo, el cerebelo integra señales procedentes de los órganos sensoriales implicados; en este caso concreto, la información proveniente de los ojos, de la actitud corporal y de la posición de los miembros, de la postura de la mano y de los dedos, así como de la actividad muscular, sumado todo ello a los impulsos que llegan del cerebro. El resultado lo va comunicando continuadamente a la corteza cerebral que, con toda esa información, adecua la secuencia de los movimientos. Nos queda, sin embargo, mucho por conocer sobre la forma en que el cerebro requiere estas informaciones y las integra en sus decisiones.

Un jugador de béisbol, por ejemplo, para lanzar un tiro largo, potente y preciso tiene que abrir los



4. NUMEROSAS FIBRAS paralelas (*líneas finas horizontales*) atraviesan una célula de Purkinje, representada aquí en el centro, vista de perfil.

dedos con una precisión temporal de milésima de segundo; de lo contrario, el tiro le saldría demasiado alto o demasiado bajo. ¿Cómo colaboran para lograrlo el cerebelo y el cerebro? El cerebelo recibe desde la corteza cerebral la orden de lanzar la pelota. Evaluando la actitud corporal y la orientación hacia el objetivo, han de adecuarse las contracciones musculares. Cualquiera de las múltiples posibles situaciones, si el jugador está corriendo o está quieto en ese momento, demanda una secuencia motora diferente o, dicho con mayor precisión, una secuencia diferente de las contracciones musculares. Cada combinación del objetivo propuesto por el cerebro con las informaciones sobre la postura corporal del jugador confluye en algún lugar del cerebelo, donde se instaura una onda de flujo. Se cree que cada combinación de éstas halla su representación en un sitio concreto del cerebelo.

La coordinación de movimientos debe, en parte, aprenderse mediante largos años de ejercicio, empezando por los procesos más sencillos. Desde el aprendizaje de la marcha en los infantes. A este respecto, los procesos de estímulo de las células granulosas del cerebelo durante el desarrollo infantil se van realizando por primera vez en diversos lugares. Los procesos que contribuyeron con éxito a determinados movimientos quedan fijados, pero el resto desaparece. Probablemente en los adultos no puedan formarse nuevos procesos. En ellos importa un segundo mecanismo de aprendizaje. Podría darse que el adulto aprenda nuevos movimientos complejos mediante la desconexión, por las fibras trepadoras, de las células de Purkinje que han reaccionado de modo inadecuado ante las ondas de flujo; se debilitan así las vías aferentes estimuladoras hasta el extremo de que la célula deja de responder ante una nueva llegada de la misma onda de flujo. Por el contrario, otras células de Purkinje cuya actividad ha contribuido al éxito del movimiento se ven reforzadas. De esta forma muchas ondas de flujo establecidas durante el desarrollo infantil se adecuan a las cambiantes necesidades motoras de los adultos.

Sintonía con los procesos psíquicos

Ahora entendemos la forma que presenta un cerebelo desplegado. La corteza del mismo consta de franjas singulares constituidas, cada una, por numerosas fibras paralelas. En el cerebelo extendido, esas fibras siguen un curso transversal respecto al eje del cuerpo, es decir, de derecha a izquierda y viceversa. Cada franja comprende el área aferente de las células de Purkinje situadas a dicha altura. Si por altura de la franja se toma la distancia entre dos células de Purkinje consecutivas en dirección longitudinal, el cerebelo contiene casi cincuenta mil franjas. El número de ondas de flujo específicas podría superar de lejos ese guarismo si, por cada franja, se procesaran muchas combinaciones de señales. De lo que se infiere la posibilidad de que en el cerebelo haya muchos más patrones motores que franjas disponibles.

La estructura en franjas explica por qué allí las prolongaciones de las neuronas inhibidoras se disponen perpendiculares a las fibras paralelas; es decir, en sentido longitudinal si hablamos de un cerebelo desplegado. Gracias a esta disposición, la franja que recibe un estímulo más intenso frena la actividad de las franjas vecinas. Y así, sólo las combinaciones de señales más adecuadas que llegan al cerebelo producen efecto en la corteza cerebral. En cambio, se soslayan las combinaciones que no son útiles, sino que interfieren en el curso del movimiento. Este bloqueo de las estructuras vecinas para que una información útil arribe nítida es habitual en el sistema nervioso; del mismo se valen, por ejemplo, las células de la retina para la definición de las imágenes que captan.

Con ese cuadro por delante, resulta fácil comprender por qué algunas lesiones cerebelosas impiden un dominio preciso de los movimientos rápidos. Los movimientos voluntarios bruscos tienen siempre componentes automáticos. Las lesiones cerebelosas merman la precisión temporal de las contracciones musculares. Esto podría explicar también por qué muchos pacientes presentan problemas de equilibrio. Para mantener la postura erecta hay que estar corrigiendo constantemente la actividad de grupos musculares y vigilando su exacta coordinación temporal mutua.

Pasó mucho tiempo hasta que los investigadores reconocieron que, además de su función reguladora de los movimientos, el cerebelo cumplía otras misiones. Los modernos métodos tomográficos, que de forma incruenta permiten ver en acción al sistema nervioso central, nos facultan para observar el cerebelo humano en pleno funcionamiento. En 1989 el grupo de trabajo de Peter Fox, de la Universidad de Texas en San Antonio, aplicó el método durante unos ejercicios de asociación lingüística. Los individuos sometidos a la prueba debían comenzar por designar el nombre de un objeto conocido; por ejemplo, el de

un perro. Puesto que el habla exige una compleja coordinación muscular, el cerebelo mostró su actividad, de acuerdo con lo esperado. Luego, los individuos del ensayo tenían que encontrar un verbo relacionado con el objeto identificado: "ladrar", el más obvio. Ante la sorpresa de los investigadores, la actividad del cerebelo fue mucho mayor al pronunciar el verbo que al pronunciar el sustantivo. Dado que las exigencias motoras para la pronunciación de uno y otro son las mismas, Fox concluía que el aumento de actividad cerebelosa se debía al esfuerzo asociativo. Evidentemente, el cerebelo participa en esta secuencia intelectual (muchas operaciones lingüísticas incluyen secuencias de actuación manual).

¿Participa también el cerebelo en otras actividades psíquicas? Con James Bower, del Instituto de Tecnología de California en Pasadena, el equipo de Fox abordó el tema en 1996. Recurrieron a experimentos táctiles. Los individuos sometidos al ensayo debían asir objetos con superficie de diversa rugosidad. Los objetos estaban introducidos en una bolsa. Tenían que levantarlos y luego dejarlos caer al suelo o bien diferenciarlos en razón de la rugosidad respectiva de su superficie. En ambos casos la actividad motora era similar. Pero, también aquí, el cerebelo se mostró mucho más activo cuando había que valorar el grado de rugosidad de la superficie. Para Fox y sus colaboradores la prueba ponía de manifiesto que el cerebelo cumplía, asimismo, importantes funciones perceptivas.

Participación en el habla

Este y otros hallazgos no menos sorprendentes sirvieron de acicate para investigar la participación del cerebelo en funciones psíquicas superiores. En numerosas ocasiones ha quedado confirmado cuán equivocado se estaba al infravalorar este órgano encefálico. Contra las conclusiones precipitadas extraídas por la fascinación provocada por algunos hallazgos se han levantado voces críticas. Diseñar ensayos de conducta en los que haya que separar tajantemente los procesos psíquicos de los puramente motores resulta más difícil de lo que pudiera pensarse. Desde el punto de vista de la motilidad, agarrar un objeto, levantarlo y dejarlo caer no es lo mismo que examinarlo con el sentido del tacto. En lo primero se tiene mucha práctica, por tratarse de una maniobra frecuente, y requiere menos actuación por parte del cerebelo.

El equipo de Fox realizó otro experimento que recibió, asimismo, críticas. Las personas que se sometieron a la prueba no sólo palparon los objetos rugosos, sino que, además, se les rozó con ellos las yemas de los dedos. Pues bien, incluso en ese caso, se desencadenó una actividad cerebelosa más intensa que la mera aprehensión y suelta del objeto. Un comportamiento que abona la tesis de Fox, según la cual el cerebelo funciona de manera diferente de lo que se venía postulando. Esta función perceptora puede interpretarse también como una diferenciación sensorial de secuencias.

Si el cerebelo interviene en la percepción y en las asociaciones, ¿produce carencias intelectuales la lesión del mismo? Para nuestra fortuna la investigación científica lo descarta de un modo tajante. Se ha observado en estudios experimentales realizados por los grupos de Irene Daum y de Hermann Ackermann, de la Universidad de Tubinga, que los pacientes no se diferencian de los sanos por su cociente intelectual.

Sí presentaban, en cambio, dificultades para discriminar entre determinados sonidos. Siempre que en una sílaba se tenga que reconocer un intervalo con una duración inferior a cien milisegundos, les cuesta a los afectados. Por ejemplo, la pausa después de la "o" en la palabra alemana *Boten* (mensajeros) es algo más prolongada que en *Boden* (suelo). Si se les hace oír a personas sanas una grabación magnetofónica del vocablo *Boden* y se prolonga electrónicamente un instante la pausa, perciben *Boten*. Sin embargo, los enfermos cerebelosos no pueden notar de entrada diferencia alguna entre ambos términos en lo que respecta a la longitud de la pausa. En la vida cotidiana esto apenas se advierte, ya que el lenguaje dispone de suficientes señales acústicas redundantes para superar el defecto.

No sólo se ha incrementado nuestro conocimiento del cerebelo en los últimos años, sino que ha cambiado en sus fundamentos. En razón de las conexiones anatómicas los investigadores habían presumido que el cerebelo intervenía en el movimiento y en las funciones cerebrales superiores. Se han multiplicado ahora las claves.

Con todo, siguen abiertas muchas cuestiones en torno a la iniciación de los movimientos. ¿Cómo y por qué vías se propagan desde el cerebelo las señales que conciernen al gobierno de los movimientos por parte del sistema nervioso en su integridad? A este propósito, lo único seguro es que, a través del tálamo, llegan sin cesar a los centros motores de la corteza cerebral informaciones procedentes del cerebelo. Nos gustaría conocer qué sucede después, cómo incorpora el cerebro esas señales y las procesa en el patrón motor. Hay motivos sobrados para investigar a fondo las interacciones entre el cerebelo y las distintas áreas de la corteza cerebral. Queda mucho por averiguar sobre la organización general del sistema nervioso central.

Bibliografía complementaria

GEHIRNGESPINSTE. NEUROANATOMIE FÜR KYBERNETISCH INTERESSIERTE. Valentin Braitenberg. Springer Verlag; Berlín, 1973.

THE DETECTION AND GENERATION OF SEQUENCES AS A KEY TO CEREBELLAR FUNCTION. EXPERIMENTS AND THEORY. Valentin Braitenberg, Detlef Heck y Fahad Sultan, en *Behavioural and Brain Sciences*, vol. 20, pág. 229; 1997.

THE CEREBELLUM AND COGNITION. Dirigido por Jeremy D. Schmahmann. Academic Press; San Diego, 1997.

A ROLE FOR THE CEREBELLUM IN LEARNING MOVEMENT COORDINATION. W. T. Thach, en *Neurobiology of Learning and Memory*, vol. 70, pág. 177; 1998.

Informatización del hogar

Gracias a unas ingeniosas técnicas, ya pueden comunicarse los ordenadores y los electrodomésticos por medio del cableado eléctrico de la casa

W. Wayt Gibbs

Muy pronto, todos los posibles terminales de una vivienda —al principio ordenadores e impresoras, en el futuro teléfonos, aparatos recreativos e incluso electrodomésticos— podrán interconectarse sin más que enchufarlos a la red eléctrica. Si entre los dispositivos de esa red hay un módem, todas las tomas de corriente de la casa darán acceso lo mismo a Internet que a la corriente eléctrica.

Desde hacía años se venía pensando que tenía que haber alguna forma de que los kilómetros de hilo de cobre que llegan a cada habitación de nuestras casas ofreciesen un doble servicio. La verdad es que ya en 1899 se concedió la primera patente estadounidense de un método de comunicaciones que utilizaba el cableado eléctrico; pero un gran número de intentos se estrellaron contra obstáculos técnicos insalvables. Tras los fracasos de firmas bien conocidas —Nortel Networks y Siemens AG—, unas compañías europeas ofrecen desde el año pasado a sus clientes servicios telefónicos y de Internet por el tendido eléctrico. Las redes eléctricas norteamericanas y japonesas tienen, sin embargo, un diseño diferente, que encarece demasiado la competición con el DSL y el cable coaxial de televisión (véase el recuadro “El tendido eléctrico e Internet”).

Mientras, han aparecido otras técnicas que permiten interconectar las máquinas que haya dentro de un edificio sin tirar más cables por las paredes. La nueva norma de conexión en red por medio de los cables eléctricos ordinarios tendrá que competir con la HomePNA, por ejemplo, que utiliza las rosetas del teléfono. Otra competidora, la norma 802.11b, o Wi-Fi, comunica por medio de ondas radioeléctricas.

La acogida de las normas HomePNA y Wi-Fi entre los propietarios de viviendas no ha sido calurosa, según Kurt Scherf, encargado por Park Associates (Dallas) de seguir el desarrollo de las redes domésticas. De todas las familias estadounidenses equipadas con varios ordenadores (unos 26 millones), debe de haber 5,5 millones ya configuradas en red, que de un 80 % a un 90 % de los casos es del tipo Ethernet. A 100 megabit por segundo, las redes Ethernet transmiten diez veces más rápido que las HomePNA y Wi-Fi, si bien han de utilizar cables especiales.

La Wi-Fi todavía resulta algo cara; además, a muchos usuarios potenciales les preocupa que sus vecinos puedan espiar los correos electrónicos que envían y las páginas Web que visitan. Con razón, afirma Scherf: “Casi todos los dispositivos inalámbricos de red poseen la opción de encriptar, pero la mayoría de los usuarios no saben cómo activarla”. La principal limitación de HomePNA es que los apartamentos y las viviendas más antiguas no suelen tener más de una o dos rosetas telefónicas.

En cambio, hay tomas de corriente por todas partes. Al no necesitar transductores de radio, el equipo de una red de comunicaciones instalada por medio de los cables de la luz puede ser más barato y más seguro que el de Wi-Fi. El quid está en conseguir un funcionamiento rápido y fiable. Las normas anteriores de transmisión de datos por cableado eléctrico —las X.10, CEBus y LonWorks eran las más conocidas— no permiten pasar de unos 10 kilobit por segundo. HomePlug Powerline Alliance, un consorcio de unas 90 empresas electrónicas e informáticas, sabía que tenía que encontrar el modo de conseguir una velocidad 1000 veces mayor.

De la tela de araña al bolso de seda

El problema atrajo a Larry W. Yonge, ingeniero de telecomunicaciones y vicepresidente de investigación de Intellon, en Ocala (Florida). Fundó hace tiempo una empresa de antenas parabólicas; tuvo un gran éxito durante años, pero acabó por sucumbir ante la competencia del cable. Cuando entró en Intellon en 1996 no se dedicó a otra cosa que a buscar la manera de construir una red doméstica de datos con los cables de la corriente eléctrica de las casas. “No era tan evidente que pudiera conseguirse,” señala. “Teníamos que diseñar un sistema entero desde sus cimientos.”

Hasta los más avezados en tratar con las interferencias dicen que las líneas eléctricas son un medio de comunicación pésimo. “Hemos diseñado un sistema muy eficaz para transportar energía eléctrica a 60 hertz”,



afirma William Blair, del Instituto de Investigación de la Energía Eléctrica de Palo Alto, en California, “pero intentar transmitir señales de comunicaciones por esos mismos hilos es desastroso”. Es como querer transcribir exactamente la partitura de una sinfonía emitida por los altavoces de un abarrotado estadio de fútbol, en los últimos minutos de una disputada final de Copa, con fuerte viento y orejeras.

En lugar del alboroto de la multitud, pongamos todo el maremágnum de aparatos domésticos que envía descargas estáticas por los hilos. El cableado doméstico, en sí, filtra con preferencia algunas frecuencias y altera la señal de un modo errático; recuerda mucho a las distorsiones que la música sufre en la megafonía. En el tren de datos se reflejan las ondas estacionarias y resonancias por realimentación generadas por los enchufes no utilizados y otros cambios repentinos de la resistencia del hilo.

El papel de las orejeras corresponde al cuadro de disyuntores de una vivienda, que atenúa las señales al dividir el cableado en secciones casi independientes. En las casas más modernas, provistas de la alimentación llamada de doble fase, es frecuente que un mensaje enviado por el hilo “activo” tenga que salir a la calle hasta alcanzar un transformador de distribución colocado en un poste del tendido eléctrico y vuelva después por el hilo de “tierra” hacia una parte diferente del edificio. Cuando la señal llega a la toma de destino puede que se haya atenuado en exceso.

Añádase a lo anterior que la forma y el tamaño de la red eléctrica cambian en la casa de manera impredecible cada vez que se acciona un interruptor. Al encender luces o conectar un alargador varían las tensiones, resistencias y corrientes.

Por si fuera poco, dice Blair, los circuitos eléctricos, largos, cerrados sobre sí mismos, se convierten en antenas y captan una gran variedad de señales radioeléctricas que interfieren la señal de datos. Pero si, para vencer el ruido, ésta se amplifica demasiado, los propios hilos transmitirán señales de radio que causarán interferencias en cualquier otro aparato; habrá, por ejemplo, zumbidos en el equipo estereofónico y perturbaciones estáticas en el televisor.

Yonge y sus ayudantes abordaron estos problemas por diversos caminos. Decidieron utilizar frecuencias muy superiores a las que nunca se hubiesen empleado, por encima de cuatro megahertz. En esa región del espectro electromagnético, los aparatos domésticos generan menos ruido y las señales tienden a pasar sin demasiadas perturbaciones de uno a otro lado del cuadro de disyuntores (o del transformador de distribución). Ya no hay orejeras.

Eligieron, además, una faja de espectro muy amplia, de los 4,5 a los 21 megahertz, y la dividieron en 84 canales. Con este procedimiento, muy semejante al que se utiliza en la telefonía celular digital, los dispositivos pueden transmitir datos a menor potencia y no contaminar tanto el entorno radioeléctrico. Para que no hubiese quejas ante la Comisión Federal de Comunicaciones estadounidense, bloquearon los ocho canales más susceptibles de interferir las señales de los radioaficionados.

“De todos modos, el tratamiento del ruido en la línea eléctrica fue el problema más arduo, el que se llevó la mayor parte de nuestro esfuerzo”, señala Yonge. Se necesitaba una técnica de transmisión capaz de adaptarse a las rápidas variaciones de las condiciones de la línea. La elección recayó en la llamada multiplexación por división de frecuencias ortogonal

Tendidos eléctricos e Internet

Algunas compañías eléctricas ofrecen ahora Internet en Europa (pero no en Norteamérica)

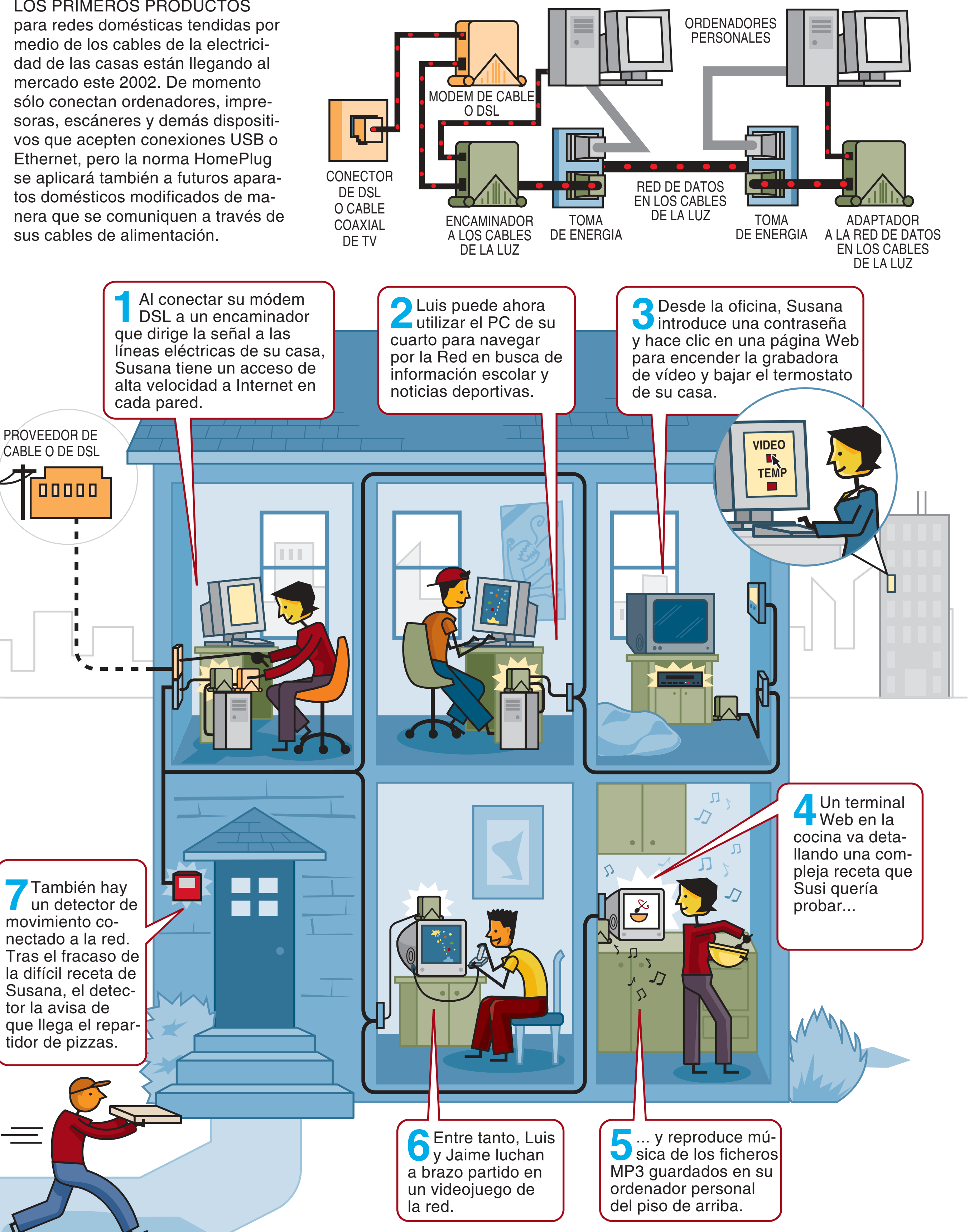
Se puede ir más allá de usar los cables de la luz de las casas en las redes de datos interiores; ahora, el tendido eléctrico conecta a Internet barrios enteros, aunque no en todas las partes del mundo. Y no sólo porque la forma de los enchufes difiere de un país a otro, sino porque además varía la estructura de la red de energía eléctrica. En la mayoría de las naciones de Europa, Asia y Sudamérica un transformador único de gran tamaño atiende a centenares de edificios. En cambio, en EE.UU., Canadá y Japón, entre otros países, se utilizan pequeños transformadores sobre postes que conectan de tres a seis vecinos sólo.

Por desgracia para las compañías eléctricas que quieran proveer servicios de Internet con su red, los transformadores se comportan como grandes filtros que borran las pequeñas oscilaciones de la corriente en las que reside la información. “Se puede instalar un amplificador de desacoplamiento para cada transformador”, dice William Blair, del Instituto de Investigación de la Energía Eléctrica de Palo Alto, California, “pero no es rentable intercalar docenas de ellos en cada circuito, como habría que hacer en EE.UU. Los europeos sí pueden instalar con un rendimiento económico aceptable un amplificador de desacoplamiento en una subestación que encamine las señales a 200 o 300 viviendas desde el transformador.”

El pasado verano la empresa alemana RWE Powerline, filial radicada en Essen de una compañía eléctrica, comenzó a ofrecer por unos 35 euros al mes un servicio de dos megabit por segundo. Los adaptadores son de la firma suiza Ascom. Esta casa informaba en septiembre de 2001 de que la compañía eléctrica Freiburgischen Elektrizitätswerken empezaba también en Suiza a ofrecer conexiones a Internet a través de sus tendidos y de que había pruebas de campo en curso en otros nueve países europeos, en Hong Kong, en Singapur y en Brasil. (Endesa las ha hecho en el Puerto Olímpico de Barcelona con dispositivos de Ascom y en Sevilla con los de la empresa de Valencia DS2; Enersis, filial de Endesa, solicitó a finales de 2001 que se le autorizase un plan piloto en un barrio de Santiago de Chile.)

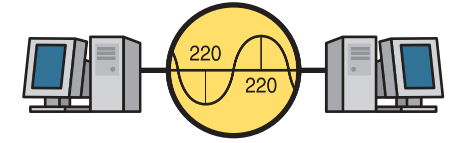
PARA CONECTARSE A UNA RED DOMESTICA NO HAY MAS QUE AÑADIR POTENCIA

LOS PRIMEROS PRODUCTOS para redes domésticas tendidas por medio de los cables de la electricidad de las casas están llegando al mercado este 2002. De momento sólo conectan ordenadores, impresoras, escáneres y demás dispositivos que acepten conexiones USB o Ethernet, pero la norma HomePlug se aplicará también a futuros aparatos domésticos modificados de manera que se comuniquen a través de sus cables de alimentación.



AFRONTAR EL RUIDO: APAPTARSE A EL Y EVITARLO

LOS CABLES DE LA ELECTRICIDAD interiores de una vivienda están diseñados para soportar una corriente que varía, con mayor o menor regularidad, entre –220 volt y +220 volt (valor eficaz de 156 volt). Las señales de comunicación —pequeñas variaciones de tensión añadidas a esta onda sinusoidal— pueden quedar sofocadas por numerosas fuentes de ruido e interferencia.

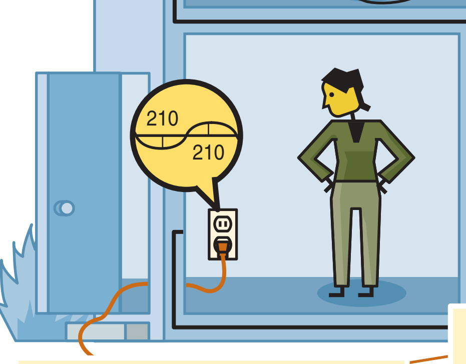


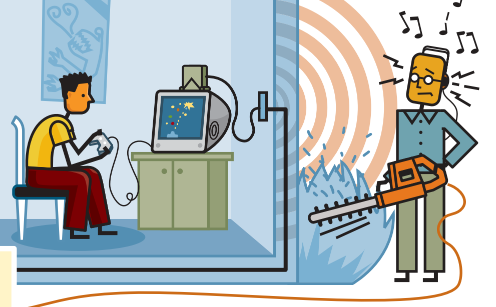


Ruido de motores
Los motores de aspiradoras, batidoras y otros utensilios generan descargas estáticas al pasar sus escobillas por los imanes. Estas descargas circulan por el cableado de la casa.

Reflexión
Los cambios bruscos de la resistencia de un circuito, por ejemplo la terminación en una toma que no se está utilizando, son un muro para las señales de comunicaciones; cuando rebotan en él pueden crearse "ondas estacionarias" que confundan al equipo de la red.

Interferencia radioeléctrica
El cableado eléctrico de una vivienda viene a ser una gran antena que capta señales de las emisiones de radio y televisión o de los radioaficionados cercanos.





Cambios de tamaño y forma
Accionar un interruptor de luz o enchufar un alargador cambia el tamaño y el carácter de la red eléctrica y hay breves caídas o elevaciones de los niveles de potencia.

Circuitos separados
El cableado doméstico se divide en circuitos cuya única conexión es el cuadro de disyuntores o un transformador de la calle. Las señales que vayan y vengan entre máquinas situadas en distintos circuitos han de salvar estas barreras.

Transmisiones parásitas
Se puede hacer frente al ruido aumentando la potencia de la señal, pero así crece a su vez el ruido radioeléctrico que el cableado emite a modo de antena.

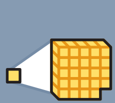
Cómo evita el ruido un sistema HomePlug

PEQUEÑOS SIMBOLOS
Para enviar un mensaje, el ordenador empieza por dividirlo en paquetes.

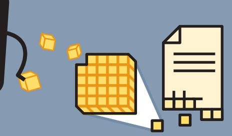
CODIGOS DE PROTECCION CONTRA ERRORES
Un algoritmo matemático intercala en el símbolo varios números que describen su contenido.

REPARACION DE DAÑOS
El adaptador de recepción utiliza otro algoritmo matemático para comprobar la integridad de los símbolos entrantes y reparar los que hayan sufrido daños menores.









Un adaptador HomePlug enchufado en la pared recibe estos paquetes y los subdivide en "símbolos", suficientemente pequeños para que pasen entre las ráfagas de ruido.

El adaptador rellena además el símbolo con un intervalo de guarda que lo protege de las colisiones con sus propios ecos y con los de otros símbolos.

MULTIPLEXACION EN BANDA AMPLIADA
Cada par de adaptadores explora 76 canales alojados en una amplia banda del espectro, de 4,5 a 21 megahertz, y bloquea los que presenten ruido o atenuación excesivos. Los símbolos se envían a la vez a todos los canales.

Después, el adaptador reúne los símbolos en paquetes y el ordenador destinatario los monta para formar una copia del mensaje original.

(OFDM), que se utiliza en Europa para la difusión de la televisión digital.

Doblegarse ante el viento

La OFDM es más sencilla de lo que sugiere su pomposa denominación (véase el recuadro "Afrontar el ruido: adaptarse a él y evitarlo"). A diferencia de la radio de FM, donde cada canal lleva un programa diferente, en la OFDM un dispositivo HomePlug emite el mensaje utilizando de un golpe todos los canales independientes (76). Antes de iniciarse el intercambio de datos entre dos adaptadores HomePlug, éstos se envían del uno al otro señales de prueba por cada uno de los canales y bloquean los que presenten niveles excesivos de ruido o atenuación. "Ese mapa de canales se actualiza a intervalos de pocos segundos", explica Yonge. De ese modo, la velocidad de la comunicación aumentará y disminuirá según sea menester mientras prosiga la conversación.

Siguiendo con la analogía del estadio de fútbol, así se neutraliza la acción del viento, pero no se compensan del todo los ecos y las súbitas ráfagas de ruido. Para evitar los ecos, a cada paquete de datos enviado a la red se le incorpora un intervalo de guarda, breve pausa que deja extinguirse las reverberaciones. Y toda carga útil digital se somete a un procesado previo que introduce información suplementaria destinada a la corrección de errores. Si el mensaje se deteriora en ruta, el receptor se valdrá de los números añadidos para reconstruir matemáticamente los bits afectados.

"Se logra gracias a un procesamiento de señales de una complejidad bien superior a la que se haya podido ver alguna vez en las comunicaciones alámbricas o inalámbricas ordinarias", señala Oleg Logvinov, presidente de la compañía de comunicaciones por medio de las líneas eléctricas Enikia, de Warren, Nueva Jersey, "pero los microcircuitos de hoy admiten un número de puertas lógicas suficiente para vencer esa complejidad". El microcircuito de Intellon es casi tan complejo como el procesador Pentium de la primera generación, aunque esté concebido para desempeñar esa única tarea.

En las simulaciones, comenta Yonge, el sistema tuvo un magnífico comportamiento. Pero la prueba real fue la pasada primavera, cuando Intellon ensayó su prototipo en más de 25 empresas y 500 viviendas de diversos tipos y tamaños repartidas por el mundo. Los miembros del consorcio habían establecido unos requisitos exigentes para que se considerara que la prueba había tenido éxito, afirma William Earnshaw, jefe de ingeniería de Intellon. "Tenía que funcionar a plena capacidad en el 80 por ciento de las viviendas y a dos tercios de su velocidad máxima en el resto." La prueba se pasó con holgura, cuenta Earnshaw; Yonge alardea de que se podía enchufar una aspiradora al lado mismo del módem sin que éste dejara de funcionar.

En noviembre, Linksys y Phonex Broadband fueron los primeros en poner a la venta dispositivos aptos para funcionar con ordenadores personales, impresoras y cualquier otro periférico que admita una conexión de red del tipo USB. Otros fabricantes no van muy rezagados. Según Linksys, los precios serán semejantes a los de los equipos Wi-Fi, pero algo superiores a los de HomePNA. "Casi todas las habitaciones tienen al menos dos tomas de corriente", señala Karen Sohl, de Linksys, "con lo cual los adaptadores a la línea eléctrica resultan más útiles que los productos para la línea telefónica" y pueden admitir un precio algo más alto. El coste del equipo irá bajando con el tiempo, afirma Tom Reed, presidente de HomePlug y director de nuevas técnicas de Radio Shack. Al no necesitar tantos circuitos analógicos, siempre costará menos fabricar adaptadores de línea eléctrica que dispositivos inalámbricos.

Reed destaca además las ventajas que tienen en materia de seguridad las comunicaciones por medio de los cables de la luz sobre las inalámbricas. Aunque las señales se propaguen a otras casas conectadas al mismo transformador —suelen ser de tres a seis en EE.UU., o todos los apartamentos de un edificio—, los microcircuitos vienen con la encriptación activada, lo que no ocurre en los equipos Wi-Fi. Y deshacer los códigos de 56 bits no es imposible, pero sí muy difícil.

Para Scherf, de Parks Associates, la técnica ha de superar dos pruebas críticas. La primera es una norma competidora, hoy en proceso de elaboración por la Asociación Electrónica de Consumidores, que no se prevé que esté concluida antes de un año. Cuando se implante, dice Yonge, HomePlug estará lanzando su versión 2, que elevará la velocidad hasta 100 megabit por segundo. De todas formas, la coexistencia de dos normas incompatibles podría crear confusiones.

En segundo lugar, y probablemente no por casualidad, las compañías que fabrican componentes de sonido, vídeo y telefonía se mantienen al margen. Esto quizá retrase varias de las aplicaciones más sugestivas de las comunicaciones por medio de las líneas eléctricas. Reed augura que será posible, por ejemplo, enchufar el receptor de imágenes por cable o satélite en una toma cualquiera e ir cambiando de sitio el televisor por toda la casa cuando se quiera. O añadir una segunda línea telefónica virtual: las llamadas que se hiciesen a un número de Oklahoma podrían recibirse en un teléfono IP —es decir, con conexión a Internet en vez de a la red telefónica ordinaria— enchufado a la red eléctrica en una casa de California; y si hay un nuevo traslado, a Boston, digamos, el número seguirá siendo el mismo.

Para que la realización de tales sueños resulte lucrativa se necesitarán nuevas estrategias comerciales. La técnica parece hoy a nuestro alcance.

Bibliografía complementaria

HOMEPLUG STANDARD BRINGS NETWORKING TO THE HOME. Steve Gardner y otros en *Communication Systems Design*, vol. 6, n.º 12; diciembre de 2000.

El universo de Georges Lemaître

Sacerdote y físico, Georges Lemaître fue uno de los fundadores de la teoría de la gran explosión. Algunas de sus intuiciones, que defendió incluso contra el mismo Einstein, se han revelado, cincuenta años más tarde, de una importancia capital

Dominique Lambert

En 1933 Albert Einstein dio una serie de clases en la Fundación Universitaria de Bruselas. Cuando un colega le preguntó si le habían comprendido bien todos los oyentes, respondió: "El profesor De Donder quizás, el canónigo Lemaître sin duda, los demás creo que no".

Se considera a Georges Lemaître uno de los fundadores de la teoría de la gran explosión ("big bang"), en la que se basa la cosmología moderna. Como fue además hombre de fe, algunos han pretendido que la hipótesis de un cataclismo originario del universo en una fecha determinada del pasado constituía, en su intención, una justificación científica de la creación bíblica del mundo.

Así, el astrónomo británico Fred Hoyle, partidario, por razones filosóficas, de un modelo de universo eterno, acuñó la expresión peyorativa "big bang" para ridiculizar las ideas desarrolladas por Lemaître. Ironías del destino, esa expresión se usa hoy, sin connotaciones negativas, para designar una teoría respaldada desde entonces por numerosos hechos experimentales. En cuanto a las convicciones científicas de Lemaître, se fundaban no en su fe (siempre supo evitar toda confusión entre ciencia y creencia), sino en argumentos matemáticos y físicos de sólido fuste. Algunos momentos señalados de su carrera esclarecen la importancia científica de varias de sus intuiciones.

Un sacerdote en Cambridge

Georges Lemaître nació el 17 de julio de 1894 en Charleroi (Bélgica). En 1911 empieza los estudios de ingeniería de minas, por los que muestra poco entusiasmo. A su regreso de la primera guerra mundial, cambia de orientación para seguir la carrera de matemáticas y física, que termina en 1920. Ese mismo año entra en el seminario de Malinas, donde, mientras se prepara para el sacerdocio, continuó estudiando los trabajos que trataban de la relatividad, restringida y general. Redacta una memoria titulada *La física de Einstein*, con la que gana una beca que le permite, tras su ordenación el 22 de septiembre de 1923, partir a Gran Bretaña, para una estancia de un año en Cambridge. Allí trabaja bajo la dirección de Arthur Eddington, el astrónomo que cinco años antes había confirmado lo que Einstein había previsto: que la fuerza de la gravitación desvía los rayos luminosos que pasan cerca del Sol.

Prosigue sus estudios entre 1924 y 1935 en el Instituto de Tecnología de Massachusetts y visita algunos de los epicentros de la astronomía mundial, sobre todo el observatorio de monte Wilson, donde se encontraba entonces el mayor telescopio que se hubiese construido. Así el joven experto de las nuevas teorías del espacio-tiempo entra en contacto con la astronomía en el momento mismo en que va a nacer la cosmología científica.

¿En qué "contexto cosmológico" se encontraba Lemaître? A mediados de los años veinte, los astrónomos atribuían al universo observado un tamaño de unas decenas de miles de años-luz, es decir, seis órdenes de magnitud menos que el tamaño que se le concede hoy (del orden de diez mil millones de años luz). Además, por un prejuicio heredado del siglo XIX, no se concebía que este universo evolucionase; menos aún, que tuviese una edad finita.

En cuanto a su contenido, desde el siglo XVIII venían pensando los

El autor

DOMINIQUE LAMBERT, doctor en ciencias físicas y en filosofía por la Universidad Católica de Lovaina, imparte clases de filosofía e historia de la ciencia en el Instituto Superior de Notre-Dame de la Paix, en Namur.

astrónomos que las estrellas visibles del cielo se juntaban en un vasto disco plano, la Vía Láctea, en cuyo seno residía el Sol. Ya en 1785 Immanuel Kant había propuesto que las nebulosas espirales descubiertas por los astrónomos con sus primeros telescopios eran agrupaciones gigantescas de estrellas parecidas a la Vía Láctea. Hoy llamamos galaxias a esos "universos-isla" imaginados por el filósofo alemán. En todo caso, hasta mediados de los años veinte del siglo XX se consideraba que esa hipótesis era dudosa. De ella se seguía que tales nebulosas tenían que encontrarse a millones de años luz y, sin embargo, los astrónomos observaban en ellas explosiones regulares que, si sucedían a semejantes distancias, debían liberar en muy poco tiempo cantidades de energía que ninguno de los mecanismos físicos conocidos por entonces era capaz de producir. Hoy se sabe que se trata de supernovas, de explosiones de estrellas gigantes, en el curso de las cuales las reacciones termonucleares desprenden más luz que miles de millones de estrellas.

Un universo eterno

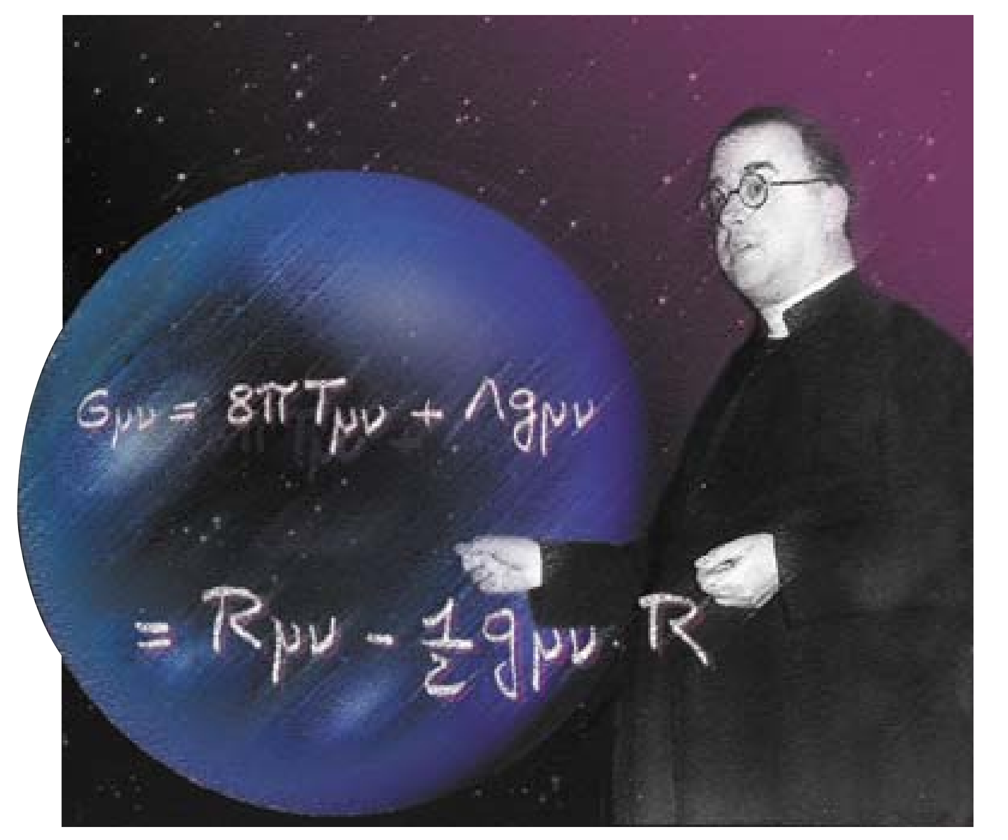
El universo de los astrónomos de la época, por lejos que observasen, no contenía más que una sola galaxia, la nuestra. ¿Es cerrado y de dimensión finita? ¿Es infinito y, por consiguiente, está casi vacío? A partir de 1916 la cuestión adquiere pleno sentido cuando Albert Einstein publica su teoría de la relatividad general, que permite a los astrónomos construir modelos cosmológicos diferentes a tenor de las hipótesis que se elijan. Einstein mostró que podía considerarse a la gravedad una manifestación de la curvatura del espacio-tiempo. Sus ecuaciones permiten calcular esa curvatura en cada punto del universo, si se conoce la cantidad de materia (o energía) que haya allí. En cuanto a la geometría global del universo, es posible, mediante algunas hipótesis sobre la distribución de la materia y de la energía en su seno, dar de ella una descripción rigurosa.

El primer modelo de universo propuesto por Einstein era una solución de sus ecuaciones en la que el cosmos se reputaba cerrado y estático. En ese modelo, el espacio es una "hiperesfera" de radio constante. Lo mismo que una criatura plana que viviese "en" la superficie (bidimensional) de una esfera vería su universo como un espacio curvo, finito aunque sin fronteras, nosotros viviríamos en un espacio tridimensional que sería la "superficie" de una hiperesfera (una esfera en un espacio tetradimensional). Para que el radio de ese universo permaneciese constante (es decir, para que el peso de la materia no provocara su hundimiento sobre sí mismo), Einstein presupuso la existencia de una "fuerza de repulsión", capaz de contrarrestar los efectos de la gravitación y de mantener el universo en equilibrio. Esa fuerza interviene en las ecuaciones de la relatividad general en forma de una constante, la llamada "constante cosmológica".

Poco después, el astrónomo holandés Willem De Sitter esbozaba otro modelo de universo, solución igualmente de las ecuaciones de Einstein, donde el espacio es infinito y nula la densidad de materia. Cuando Lemaître empieza a trabajar en los problemas cosmológicos, la comunidad astronómica no se refiere más que a esos dos modelos.

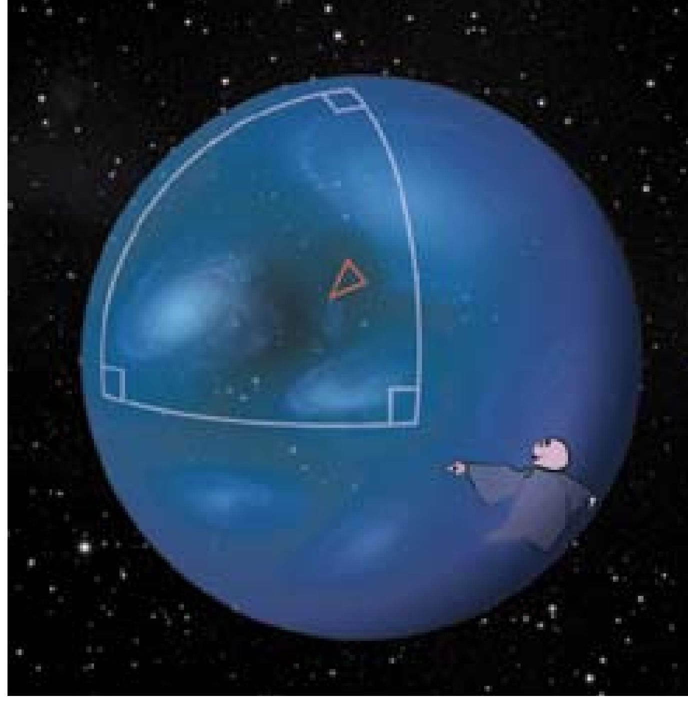
Un universo en expansión

Pero en 1925 el astrónomo estadounidense Edwin Hubble descubre en el observatorio de monte Wilson que la "nebulosa" de Andrómeda dista de nosotros varios millones de años luz; resurge la polémica sobre la naturaleza de las "nebulosas". Georges Lemaître toma, pues, contacto con la cosmología en el momento mismo



1. GEORGES LEMAÎTRE en noviembre de 1949, delante de las ecuaciones de la relatividad general que ligan la geometría del espacio-tiempo a su contenido de materia y energía. El factor constante Λ significa que el propio vacío está dotado de cierta densidad de energía capaz de acelerar la expansión del universo. Lemaître defendió esta "constante cosmológica" contra Einstein, que la había abandonado muy pronto.

2. UNA CRIATURA BIDIMENSIONAL que viviese en la superficie de esta esfera verificaría que su universo es finito (puede dar una vuelta completa a su alrededor), pero que carece de fronteras. La geometría no es allí euclídea: la suma de los ángulos de un triángulo (*azul*) es mayor que 180º, y hay "rectas" (el camino más corto entre dos puntos) que, aunque paralelas, se cortan a una distancia finita (por ejemplo, dos perpendiculares al ecuador de la esfera se cortarán en el polo). Pero a pequeña escala la geometría está muy cerca de la geometría euclídea. Muchos modelos de universo estipulan que el espacio, euclídeo a nuestra escala, es la superficie de una hiperesfera, un análogo tridimensional del mundo de la criatura plana.

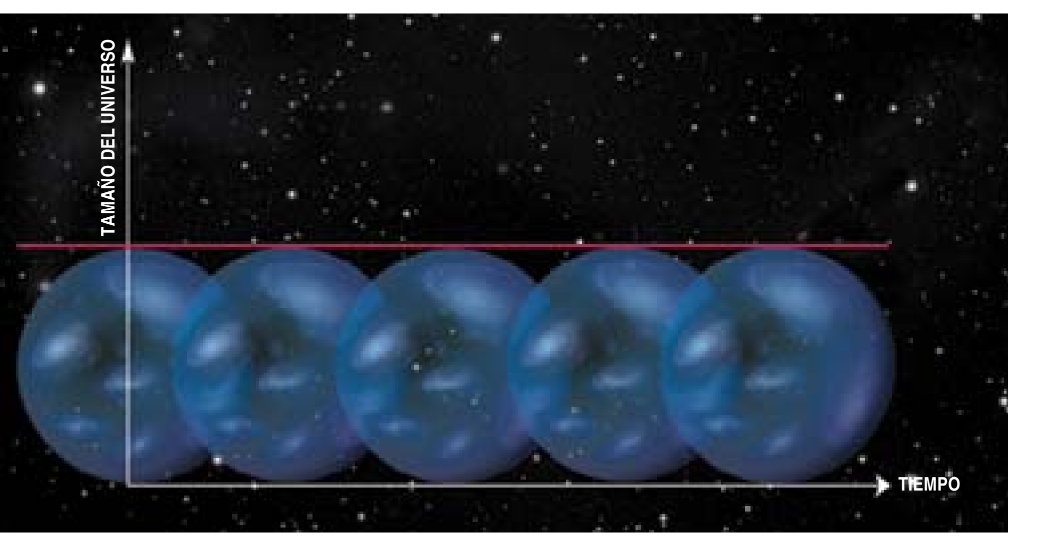


en que torna a emerger la idea de un universo inmenso sembrado de galaxias. Por otra parte, los astrónomos se disponen entonces a establecer que la luz que recibimos de la mayoría de esas galaxias está desplazada hacia longitudes de onda grandes (hacia el rojo), lo que parece indicar que se alejan muy veloces de nosotros.

Así, Lemaître se ve conducido de forma natural a buscar una explicación de esa "recesión" de las galaxias (independientemente del ruso Aleksander Friedman). Propone en 1927 una tercera solución de las ecuaciones de Einstein: el tamaño del universo crecería de manera exponencial y confluiría con los dos grandes modelos de la época en un pasado y un futuro infinitamente remotos. En un tiempo pasado muy distante, ese universo se comportaría como el universo estático de Einstein; en el futuro, el universo de Lemaître tendería —su masa es constante, su tamaño no deja de crecer— hacia el modelo de De Sitter, totalmente vacío. En el intervalo entre ambos extremos, la expansión del universo explicaría que las galaxias se alejaran unas de otras.

Por medio de esta solución, ya en 1927, Lemaître estableció la ley que gobierna la recesión de las galaxias; estipula que dos galaxias se alejan mutuamente a una velocidad proporcional a la distancia que las separa. A partir de un catálogo de 42 galaxias de las que se conocía un orden de magnitud de las distancias, así como las velocidades de escape, calcula la constante de proporcionalidad en 625 kilómetros por segundo y megaparsec (es decir, dos galaxias distantes entre sí un megaparsec, que es un poco más de tres millones de años luz, se separarían entre sí a 625 kilómetros por segundo). De ese modo, Lemaître es el primero en establecer teóricamente la ley... de Hubble, aunque el valor que le da a la constante, llamada también "de Hubble", sea exagerado. El astrónomo estadounidense se llevó los honores de la posteridad porque fue el primero, dos años más tarde, en publicar una compilación detallada de observaciones de las que se desprendía esa ley.

Con el modelo de 1927, Lemaître fue uno de los primeros cosmólogos que concibieron un universo en evolución. Con todo, el universo no tiene todavía un comienzo. ¿Por qué prefería Lemaître —momentáneamente— la idea de un universo con un pasado infinito? Parece que esta elección derivaba de que sobrestimase la constante de Hubble. En efecto, si el universo estaba hoy en una expansión muy rápida, su tamaño, en un pasado bastante reciente, tuvo que ser mucho menor. La inversa de la constante de Hubble da un orden de magnitud del período reciente de la expan-



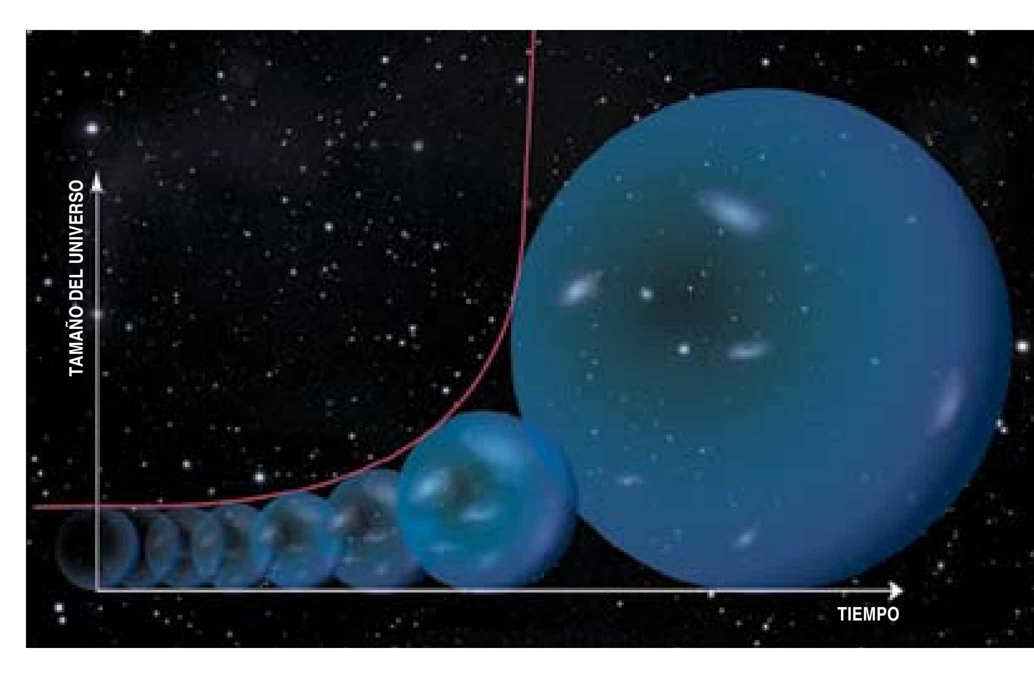
3. POR UN MODELO donde el universo es eterno apostaba Einstein. En este recuadro el tamaño —finito— del universo es constante. Como este universo tiende a desplomarse sobre sí mismo, porque las masas se atraen por el efecto de la gravitación, Einstein propuso la existencia de una segunda fuerza, de repulsión, que incluyó en sus ecuaciones en forma de una "constante cosmológica". A principios de los años treinta Lemaître mostró que el equilibrio así obtenido era inestable.

sión. Con un valor del orden de 625 kilómetros por segundo y parsec a Lemaître le sale que el universo tiene menos de mil millones de años, edad inferior a los dos mil millones que se le atribuían a la Tierra en su época. Este resultado se basaba en el estudio de las concentraciones de uranio y plomo en las rocas más antiguas; el valor que se admite hoy es de unos 4500 millones de años.

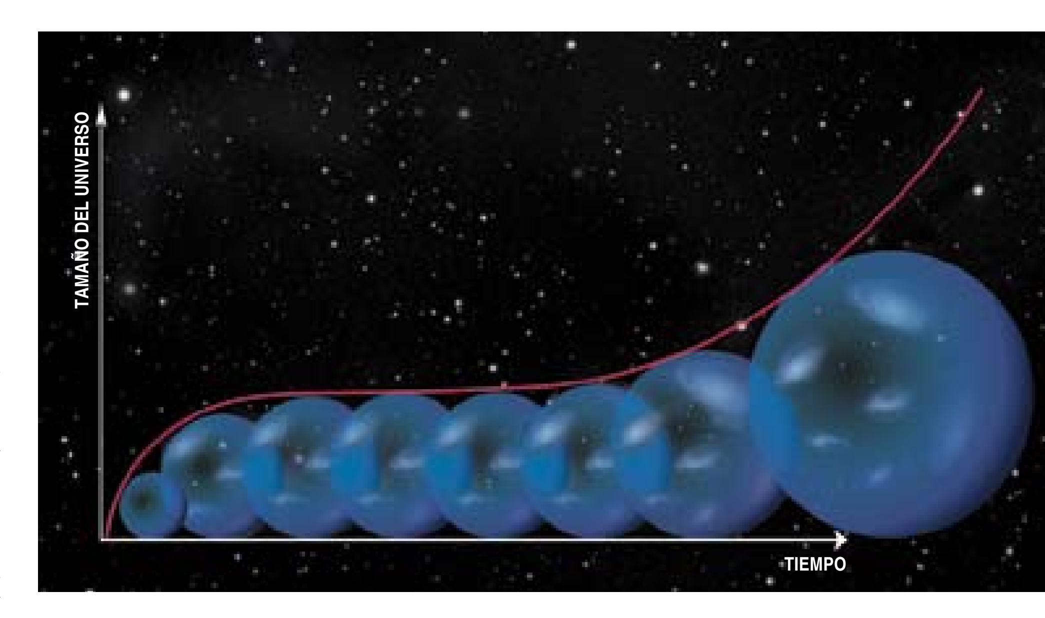
El modelo de universo en que el radio crece de manera exponencial supera la dificultad al dar al universo un pasado infinito donde su tamaño es casi constante y admitir un período de expansión reciente conforme al alejamiento observado entre las galaxias. Hoy se atribuye a la constante de Hubble un valor del orden de 70 kilómetros por segundo y megaparsec (se han mejorado considerablemente las estimaciones de las distancias de las galaxias). Se deduce de ello que el universo tiene unos 14.000 millones de años, edad compatible con los datos geológicos.

La formación de las galaxias

En el marco de sus modelos de universo en expansión Lemaître emprende una primera descripción de la formación de las galaxias. Aprovecha para ello los métodos que elaboró en los años 1924-25 cuando trabajaba en el Instituto de Tecnología de Massachusetts. Eddington llamó entonces su atención sobre una cuestión suscitada por los trabajos del astrónomo alemán Karl Schwarzschild, que había encontrado una solución de las ecuaciones de Einstein que describía el campo gravitatorio en el interior y el exterior de una bola de materia cuya densidad se suponía constante (hipótesis que constituían un modelo muy simplificado de estrella). La solución obtenida para el interior de la esfera homogénea hacía aparecer una paradoja: al añadirle materia crecía su radio al mismo tiempo que su masa, pero los cálculos mostraban que más allá de cierto tamaño límite (y, por lo tanto, de cierta masa), la presión en el centro de la estrella se volvía infinita. Parecía, pues, que no podía exis-

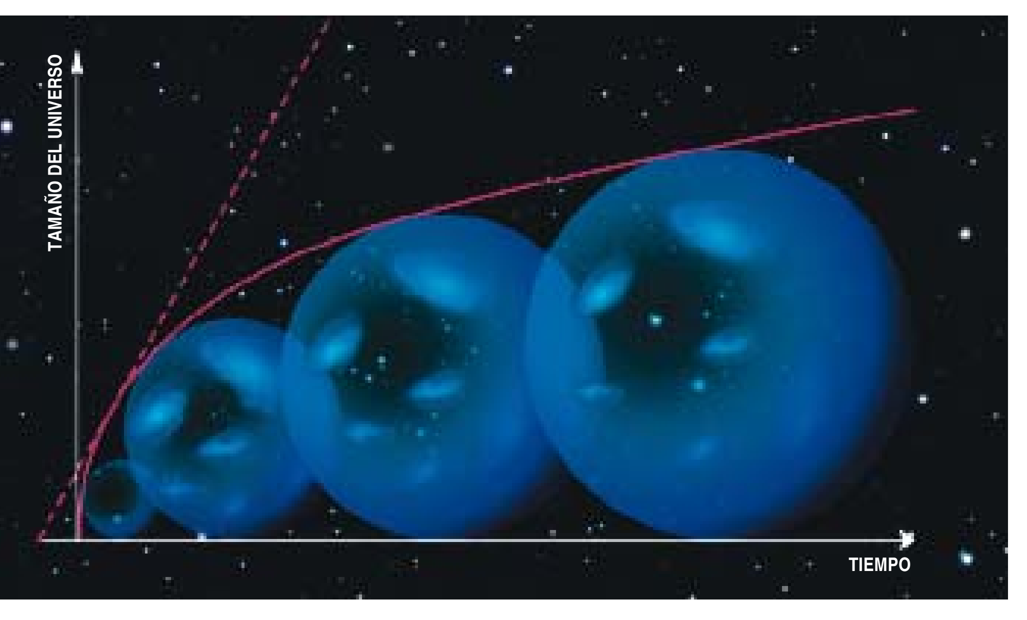


4. UN UNIVERSO EN EVOLUCION PERO ETERNO era el propuesto por Lemaître en 1927. La expansión del espacio explica el hecho de que las galaxias se separen unas de otras a una velocidad proporcional a la distancia que medie entre ellas. En este modelo la constante cosmológica no es nula y la fuerza de repulsión que engendra acelera la expansión de manera exponencial. El comienzo del universo se pierde en un pasado infinitamente lejano, donde acaba por "confluir" con el modelo estático de Einstein. La demostración de que un universo estático es inestable llevó a Lemaître a abandonar este último modelo.

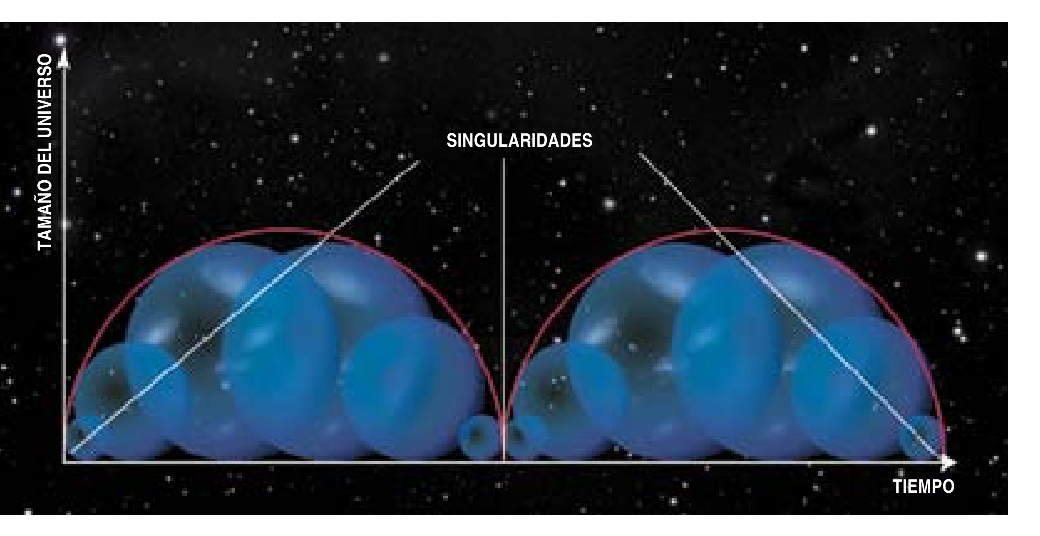


5. DOS FUERZAS ANTAGONICAS se disputan el control del universo en el modelo que Lemaître defenderá hasta el final de su vida. El mundo empieza por una singularidad inicial, en una fecha finita del pasado; luego, la gravitación frena su expansión. Inicialmente muy débil, la fuerza de repulsión, engendrada por la constante cosmológica, llega a igualarse con la gravitación; el universo conoce entonces una fase de cuasiequilibrio que dura más o menos tiempo según el valor de la constante. A continuación, la formación de cúmulos de galaxias rompe el equilibrio y se reemprende la expansión, esta vez acelerada. Nuestro universo se halla en esta tercera fase.

tir ningún astro más allá de ese límite. Pero, como señaló Eddington, la hipótesis de una densidad uniforme de la materia era poco conforme con el espíritu de la relatividad, pues en esa teoría la densidad de materia no es una magnitud invariante (la masa puede transformarse en energía y unos observadores en movimiento entre sí no medirán, para los mismos objetos, energías idénticas).



6. CUANDO SOLO LA GRAVITACION determina la evolución del universo la constante de Hubble basta para calcular su edad. La atracción entre las galaxias frena su recíproco distanciamiento y la expansión. Por consiguiente, la constante de Hubble, que es la pendiente de la curva que da el tamaño del universo en función del tiempo, disminuye a medida que el universo envejece. Se calcula fácilmente la edad que tendría el universo si su expansión hubiese sido constante y caracterizada por el valor actual de la constante de Hubble (*línea de puntos*). Esta edad teórica constituye un límite superior de la edad real del universo.



7. EL UNIVERSO FENIX crece, alcanza su tamaño máximo y se desploma sobre sí mismo antes de volver a empezar un ciclo nuevo de expansión y contracción. Hace que aparezcan puntos de densidad infinita, las singularidades, que parecen no tener sentido físico. Einstein se preguntaba si, en caso de que se admitiese que el universo no es rigurosamente isótropo, los cálculos no harían desaparecer las singularidades. Lemaître demostró que no.

Lemaître rehízo los cálculos de Schwarzschild abandonando la idea de una densidad constante (sólo consideró constante una magnitud invariante de acuerdo con la relatividad, la "traza del tensor energía-impulso", que combina la densidad de energía y la presión de la materia). Mostró entonces, en contra de lo que esperaba Eddington, que la paradoja descubierta por Schwarzschild subsistía: hay realmente un radio más allá del cual ningún astro podía estar en equilibrio.

Gracias a ese trabajo, Lemaître pudo estudiar espacios de simetría esférica llenos de un fluido cuya densidad no era necesariamente homogénea. En los años treinta, con esa base, propuso un modelo donde las galaxias se formaban a partir de fluctuaciones locales de la densidad de la materia en un universo en expansión. En el marco del modelo las partículas de materia contenidas en el universo se aglutinan al azar, obedeciendo a fluctuaciones estadísticas. Aparecen zonas de densidad ligeramente superior a la media, que al derrumbarse bajo su propio peso y atraer la materia circundante dan lugar a las galaxias, reagrupadas luego en cúmulos de galaxias, las mayores estructuras observadas hasta ahora en el universo. Lemaître muestra entonces que el cálculo de los cúmulos de galaxias engendrados conforme a su modelo concuerda con las mediciones tomadas por Hubble para el cúmulo de Coma.

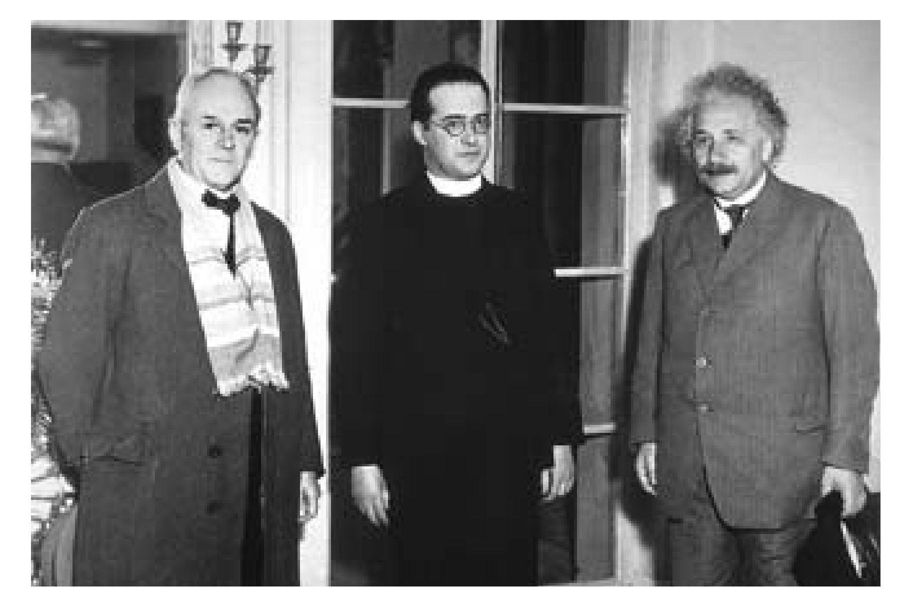
No obstante, hoy se sabe que las fluctuaciones concebidas por Lemaître (fluctuaciones estadísticas en un universo esencialmente homogéneo) no bastan para producir las macroestructuras del universo. La radiación fósil captada por el satélite COBE ofreció una imagen del universo a sus 300.000 años de edad que revelaba la existencia de variaciones de la densidad, origen, así se cree, de las macroestructuras. La idea de que las galaxias y los cúmulos de galaxias se han formado a partir de condensaciones locales de materia sigue siendo hoy la preferida por los astrónomos. Sin embargo, muchos astrofísicos piensan que su origen estuvo más bien en fluctuaciones microscópicas de naturaleza cuántica que se

amplificaron en el curso de la inflación del universo (una fase de expansión exponencial que habría multiplicado todas las distancias por un factor 10^{50} en unos 10^{-32} segundos).

La edad del universo

A principios de los años treinta Eddington contribuyó de nuevo a orientar el rumbo de los trabajos de su antiguo alumno al despertarle un vivo interés por la cuestión del origen del universo. En 1931 el astrónomo de Cambridge publicó un artículo en la revista *Nature* en el que confesaba: "Desde una óptica filosófica, me repugna la idea de que el presente orden de cosas haya tenido un comienzo". Ante esa declaración de principios, Lemaître reaccionó con la publicación, en la misma revista, de una nota breve en la que mostraba que la termodinámica y la mecánica cuántica podían dar un sentido físico a un comienzo del mundo. En ese artículo describía un estado inicial del universo en el que todos los cuantos de energía se juntaban en uno solo, al que denominaba "átomo primitivo"; fuera de él las nociones de espacio y tiempo carecían de sentido. Ese estado muy "ordenado" era inestable; a partir del átomo primitivo, unas desintegraciones sucesivas, comparables a las desintegraciones radiactivas, engendraban progresivamente la materia, el espacio y el tiempo tal y como los conocemos hoy. Para Lemaître, "semejante comienzo del mundo está suficientemente alejado del presente orden de cosas como para que no resulte repugnante del todo". La hipótesis que anunciaba la moderna teoría de la gran explosión emprendía su camino.

Por lo demás, a principios de los años treinta Lemaître muestra que el menor cambio en la distribución de la densidad de materia del universo podía dar ventaja sobre la gravedad a la fuerza de repulsión ligada a la constante cosmológica. El equilibrio entre esas dos fuerzas sobre las que reposaba el modelo estático de Einstein era, por consiguiente, inestable; debía bastar para romperlo la formación de las galaxias a partir de las fluctuaciones de la materia del universo. Así, parece imposible que el universo siga siendo estático indefinidamente.



8. ROBERT MILLIKAN, GEORGES LEMAÎTRE Y ALBERT EINSTEIN en enero de 1933. Tras su encuentro con Millikan, Lemaître llegó a la convicción de que los rayos cósmicos eran reliquias de la desintegración del átomo primitivo.

Tal y como la enuncia Lemaître, la hipótesis del átomo primitivo es más una intuición física que una teoría rigurosamente elaborada. Se corresponde con la elección de un nuevo modelo cosmológico en el que la edad del universo es finita. Se trata de un universo homogéneo, una hiperesfera cuya evolución comienza por un estado de densidad infinita, una singularidad, que Lemaître considera el límite impuesto por las leyes clásicas de la relatividad cuando se está cerca de las condiciones exóticas que reinaron en la época del átomo primitivo. La evolución del universo está dominada por dos fuerzas, la gravitación y la "fuerza de repulsión", cuya intensidad viene determinada por la constante cosmológica. Este modelo, que defenderá hasta el final de su vida, comprende tres fases características.

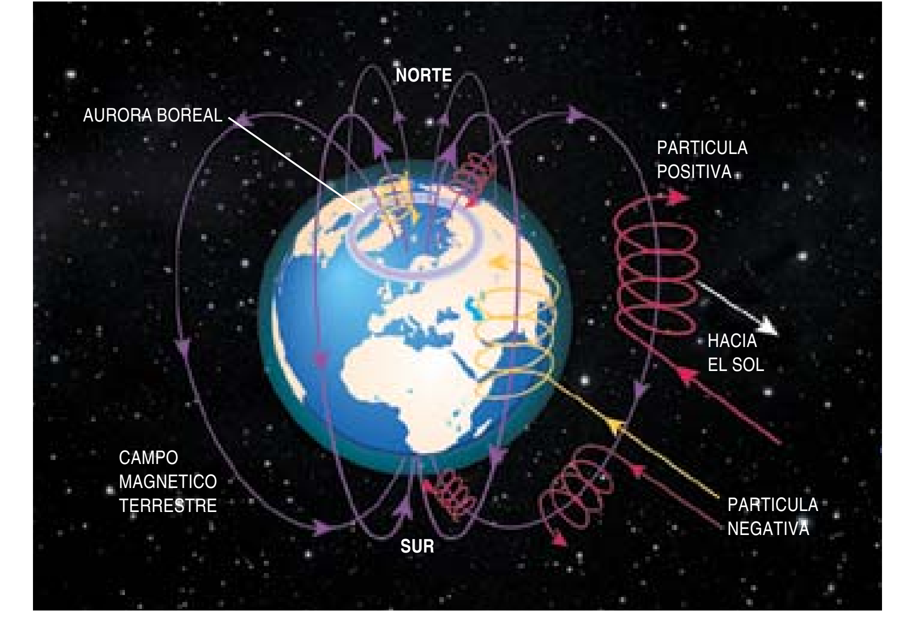
De la importancia de una constante

En el curso de la primera fase, que comienza con la singularidad inicial, el universo entra en expansión y el espacio se llena con los productos de la desintegración del átomo primitivo. La atracción gravitatoria que se ejerce entre las partículas de materia frena progresivamente la expansión.

La segunda fase corresponde a un equilibrio entre la gravitación y la fuerza repulsiva ligada a la constante cosmológica: el radio del universo permanece, momentáneamente, casi constante, como en el universo de Einstein.

La tercera y última fase de la historia del universo según Lemaître incluye la época actual y empieza cuando la formación de macroestructuras y de las galaxias rompe el equilibrio del período cuasi-estático y hace que se reanude la expansión acelerada bajo el efecto de la constante cosmológica.

Lemaître concedía mucha importancia a esta constante. Se oponía, pues, a Einstein, que renunció a ella ("es el peor error de mi vida", habría dicho) al mismo tiempo que el descubrimiento del distanciamiento entre galaxias le obligó a abandonar su modelo de universo estático. Visionario, Lemaître prevé que la mecánica cuántica podría un día dar un sentido físico a esa constante que parece significar que el vacío está dotado de cierta densidad de energía. Se piensa hoy que Einstein trató la constante cosmológica con demasiada ligereza



9. LAS AURORAS BOREALES están producidas por las partículas dotadas de carga eléctrica que emite el Sol y que el campo magnético terrestre atrapa. Lemaître estudió los rayos cósmicos suponiendo que adoptan trayectorias semejantes hasta que se acercan a nuestro planeta. Las partículas de carga positiva (*en rojo*) circulan alrededor de las líneas de fuerza del campo magnético terrestre (*violeta*) en sentido inverso a las de carga negativa (*amarillo*). Por eso llegan al observador en tierra según direcciones próximas al oeste geomagnético (mientras que las partículas negativas llegan por el este). Puesto que se trata de la misma dirección que aquella donde se reciben más rayos cósmicos, Lemaître dedujo que están constituidos por partículas de carga positiva.

y que no es una mera "opción", sino un elemento fundamental para su teoría a causa de la existencia de una energía del vacío cuántico: la mecánica cuántica dicta que, incluso en un espacio vacío, aparezcan y desaparezcan sin cesar pares de partículas y antipartículas (si no, el valor de todos los parámetros físicos se conocería con una precisión perfecta —serían todos nulos—, lo que contradice el principio de indeterminación de Heisenberg).

Se ha establecido hace poco que es muy probable que la constante cosmológica no sea nula. Por lo demás, Lemaître insistió en que, si se modifica su valor, se modifica la edad del universo. Veía en ello un argumento adicional para conservarla. En efecto, si la evolución del universo no está gobernada más que por la gravitación, basta la constante de Hubble para determinar su edad. Sin embargo, con el valor de la constante de Hubble de que se disponía en los años treinta, esa edad resultaba siempre inferior a la del sistema solar; había que corregir tal anomalía. Ya en 1931, basándose en un límite superior de la constante cosmológica, Lemaître cifró en diez mil millones de años la edad del universo (un buen orden de magnitud incluso hoy en día).

La ciencia ha abandonado su hipótesis del átomo primitivo y su presentación de la síntesis de los elementos químicos por desintegraciones sucesivas. Además, la geometría espacial del universo parece ser euclídea y no esférica, como Lemaître la concebía siempre. No obstante, diversas observaciones recientes sobre las supernovas lejanas parecen abonar la idea de que el valor de la constante cosmológica no es nulo, sino positivo, y, por consiguiente, que la evolución del universo se caracteriza por las tres fases propuestas por Lemaître.

El problema de las singularidades

A principios de los años treinta se admitía que había galaxias fuera de la nuestra y que el universo se expandía; se deducían de ello modelos del cosmos en evolución permanente, en el curso quizá de una duración finita. Esta idea sigue, sin embargo, chocando con las preferencias filosóficas de numerosos físicos. No sólo les obliga a aceptar que el universo tuvo un comienzo, sino, también, que ese comienzo consistió en un estado de densidad infinita, en una singularidad donde las leyes de la física pierden todo su sentido.

En enero de 1933 Einstein, que acababa de abandonar Alemania por los Estados Unidos, se encuentra con Lemaître en el Instituto de Tecnología de California. Le pregunta si se podían eliminar las singularidades que aparecían en la historia del "universo fénix", un modelo que establecía que el universo se expande a partir de una singularidad, alcanza un tamaño máximo y vuelve a caer en una nueva singularidad antes de recomenzar un nuevo ciclo de expansión y contracción. Como todos los modelos concebidos por los astrónomos, es homogéneo e isótropo (sus propiedades son las mismas en todos los puntos del espacio y en todas direcciones). Según Einstein, esa isotropía podría ser la causa de que apareciesen singularidades. Si se admitiese una ligera anisotropía del universo (que estuviera en expansión en dos de las direcciones del espacio y en contracción en la tercera, por ejemplo), quizá no se desplomaría sobre sí mismo (no "se colapsaría", con el barbarismo al uso) y se evitaría la singularidad. Lemaître probó rápidamente, con la ayuda de un caso particular, que la singularidad no desaparecería, ni siquiera aunque el universo no fuese isótropo. El paso por un estado de radio "nulo" parece realmente obligado para la mayoría de los modelos del universo. Este "experimento matemático" prefigura los teoremas sobre las singularidades de Roger Penrose y Stephen Hawking que demostraron, con métodos globales, que aparecen, de manera inevitable, singularidades físicas en muchos de los modelos posibles del espaciotiempo.

Los rayos cósmicos

Según Lemaître, una de las consecuencias de la hipótesis del átomo primitivo era la existencia de partículas cargadas de gran energía producidas en las primeras de-

sintegraciones de ese átomo. Tras un encuentro con Robert Millikan, Lemaître se convenció de que esas partículas eran precisamente los rayos cósmicos que se captan a grandes alturas y cuya naturaleza y origen precisos se ignoraban todavía en los años treinta. La detección y el estudio de los rayos cósmicos presentaban para él una importancia crucial, pues éstos eran, según sus propias palabras, "jeroglíficos" que había que descifrar si se quería conocer los primerísimos instantes del universo.

Lemaître y Manuel Sandoval Vallarta, compañero suyo en el Instituto de Tecnología de Massachusetts, se pusieron a estudiar las propiedades de las trayectorias de los rayos cósmicos. Varios observadores habían mostrado que la intensidad de la radiación cósmica variaba con la latitud geomagnética (la latitud medida no a partir del polo geográfico de la Tierra, sino del magnético). Fiados de su hipótesis según la cual esos rayos eran partículas dotadas de carga procedentes de la desintegración del átomo primitivo, Lemaître y Sandoval se aplicaron al cálculo de la interacción entre tales partículas y el campo magnético terrestre para explicar, sobre todo, el "efecto de latitud".

Carl Störmer, de la Universidad de Oslo, había ya abordado un problema similar en 1907. Estudiaba la interacción entre las partículas dotadas de carga, emitidas por el Sol, y el campo magnético terrestre a fin de obtener una teoría completa de las auroras boreales. Se debe la producción de estos fenómenos luminosos a las partículas cargadas emitidas por el Sol. Al acercarse a la Tierra adoptan éstas una trayectoria helicoidal a lo largo de las líneas del campo magnético terrestre y se canalizan hacia los polos. Cuando penetran en la atmósfera, ionizan los átomos de nitrógeno y de oxígeno del aire, que, a su paso, se desexcitan con emisión de luz.

Presuponiendo que los rayos cósmicos —partículas mucho más energéticas que las del viento solar— provienen de todas las direcciones del espacio (y no sólo del Sol), Lemaître y Sandoval completaron el enfoque de Störmer y estudiaron sus trayectorias en el campo magnético terrestre. Con la ayuda de un ordenador analógico —la "máquina de Bush"— capaz de integrar sistemas de ecuaciones diferenciales y de dar representaciones gráficas de las soluciones, lograron representar y estudiar en el Instituto de Tecnología de Massachusetts millares de trayectorias de rayos cósmicos. Gracias a este trabajo Lemaître y Sandoval Vallarta confirmaron que la cantidad de rayos cósmicos recibida sobre la Tierra tenía que variar con la latitud geomagnética. Además, establecieron que las partículas que constituyen los rayos cósmicos eran, sobre todo, partículas dotadas de carga positiva.

En su investigación de esos "jeroglíficos", vestigios de los inicios "explosivos" del universo, Lemaître fue uno de los primeros físicos que propusieron la existencia de una radiación fósil que podría dar una base experimental a la cosmología. Qué duda cabe de que la radiación fósil, que se detectó en los años sesenta, es de naturaleza muy diferente de la propuesta por Lemaître; hoy se considera, además, que los rayos cósmicos son partículas de gran energía —protones y núcleos atómicos ligeros—, producidas mucho más tarde en la historia del universo, especialmente por las supernovas. Con todo, ciertas partículas con una energía del orden de 10^{19} electronvolt no pueden producirse de esa forma; algunos físicos piensan que provienen de la desintegración de partículas exóticas de masa elevada, creadas en los primerísimos instantes del universo. En 1998 un defensor de esta teoría, Michael Hillas, de la Universidad de Leeds, concluía así uno de sus artículos: "Bien puede que Lemaître no estuviese ni mucho menos equivocado."

Lemaître sentía pasión por el cálculo numérico y las máquinas de cómputo. En Lovaina adquirió toda una serie de máquinas de cómputo mecánicas, luego electromecánicas. En 1958 trajo a la Universidad Católica el primer ordenador que hubo en ella, un Burroughs E101, con el que efectuó cálculos relativos a los modelos de cúmulos de galaxias desarrollados en los años cuarenta y cincuenta a raíz de sus trabajos sobre las condiciones de materia en el universo en expansión.

De la matemática a la cosmología

Pionero de la cosmología, Lemaître fue igualmente, como muchos de los teóricos de la física clásica, un matemático de primera fila que aportó soluciones originales a ciertos problemas de la mecánica celeste (el problema de los tres cuerpos) o incluso del cálculo numérico (la transformada de Fourier rápida). En su época, otros, más interesados por los prometedores territorios de la mecánica cuántica, se alejaron de ese tipo de problemas, mientras que los matemáticos preferían ceñirse a las estructuras abstractas a la manera Bourbaki. En los medios matemáticos de los años cincuenta pasaba por un marginal. Su pasión por los ordenadores, por el cálculo numérico y la experimentación matemática era, sin embargo, muy moderna, tal y como sus ideas sobre la historia del universo, que defendió a veces contra el mismo Einstein. El reciente descubrimiento de la importancia de la constante cosmológica confirma su intuición y constituye, quizás, el mayor desafío lanzado a los físicos para el siglo que empieza.

Bibliografía complementaria

COSMOLOGY OF LEMAÎTRE. O. Godart y M. Heller, en *History of Astronomy Series*, vol. 3. Pachart Publishing House, Tucson, 1985.

COSMOLOGY AND CONTROVERSY. THE HISTORICAL DEVELOPMENT OF TWO THEORIES OF THE UNIVERSE. H. Kragh. Princeton University Press, 1996.

ESSAI DE COSMOLOGIE. A. Friedman y G. Lemaître. Precedido de *L'invention du Big Bang*, de J. P. Luminet (textos escogidos, presentados, traducidos y anotados por J. P. Luminet y A. Grib). Éditions du Seuil, Collections Sources du Savoir, 1997.

UN ATOME D'UNIVERS. LA VIE ET L'OEUVRE DE GEORGES LEMAÎTRE. D. Lambert. Éditions Racine/Éditions Lessius, 2000.

PERFILES

W. Wayt Gibbs

RICHARD BORCHERDS: Un disparate monstruoso pero verdadero

Hablar con Richard Borcherds sobre su trabajo puede poner un poco nervioso. No es sólo por la dificultad de intentar seguirle el paso al intelecto de alguien que ha ganado el más alto galardón de las matemáticas, la Medalla Fields. Es que además se le ve en la manera de moverse que se siente cohibido. Llego a su despacho, en un anodino rincón de la Universidad de Cambridge, justo a la hora prevista, llamo con suavidad a la puerta y sin embargo mi entrada le sume en la confusión. Empieza a dar vueltas como un león enjaulado, agita los brazos sin apuntar a nada.

"No expreso bien mis sentimientos", dice de buenas a primeras. "Una vez leí en algún sitio que la parte izquierda del cerebro se encarga de las matemáticas y la derecha de las emociones y de la expresión. Con frecuencia he tenido la sensación de que hay una especie de desconexión entre las dos mitades."

La investigación matemática no es, como algunos creen, un ejercicio puramente intelectual, o al menos no lo es para Borcherds. "La progresión lógica sólo llega al final, y la verdad es que es bastante aburrido comprobar si los detalles funcionan de verdad", dice. "Antes hay que cuadrarlo todo mediante una gran dosis de experimentación, conjeturas e intuición."

Ahí se trasluce lo que más inquieta cuando se habla con Borcherds: a través de sus ojos, de su trabajo, se vislumbra un universo alternativo lleno de objetos prodigiosos, reales pero no físicos.

"Una parte de las matemáticas es sin duda invención humana", añade, en especial todo lo que dependa de que usemos un sistema de numeración de 10 cifras. "Pero otra parte existe antes de que la descubramos. Es el caso del teorema de Pitágoras. Ha sido descubierto varias veces por diversas civilizaciones. Está realmente ahí. Los de Alfa Centauro también tendrían alguna versión del teorema."

Y si se adentrasen un buen trecho en el abstracto universo de las matemáticas puede que diesen con tres singulares objetos y descubrieran, como Borcherds, que están conectados de manera profunda pero aún misteriosa. No es probable, en cambio, que denominasen a semejante problema "la conjetura disparatada del monstruo (*monstrous moonshine conjecture*)", como dio en llamarle el mentor de Borcherds, John H. Conway, profesor de Cambridge.

El problema surgió en 1978, cuando John McKay, de la Universidad Concordia, se quedó intrigado por una extraña coincidencia. "Estaba leyendo un libro del siglo XIX sobre las funciones modulares elípticas", recuerda McKay, "y me di cuenta de algo raro en la expansión de una de ellas en particular", la llamada función *j*. Esta función modular elíptica, como explica John C. Baez, de la Universidad de California en Riverside, "aparece al estudiar las superficies de las rosquillas que se crean cuando se va enrollando el plano complejo". En una hoja de papel milimetrado se numeran las columnas con números enteros y las filas con números imaginarios. Se enrolla la hoja y se unen los extremos del tubo para crear roscas de varios tamaños y formas. "Si se le da a la función *j* la forma de uno de esos toros, la convertirá en un número complejo concreto." Aunque la función *j* suena a algo arcano, es una útil herramienta para las matemáticas y la física.

McKay dio con la extraña coincidencia al observar los coeficientes de la función *j* cuando ésta se escribe en forma de suma infinitamente larga. El tercer coeficiente era 196.884. Ese número hizo que se le encendiese una luz.

Para enseñarme por qué, Borcherds levanta de su mesa, con algún esfuerzo, un libro del tamaño de un atlas. Lo abre por una tabla de números impresos en una caja tan pequeña que apenas si se pueden leer. El primer número es el 1; el siguiente el 196.883. La suma de los dos es aquella cifra de la función *j*, lo cual es tremendamente extraño, pues esta tabla no tiene nada que ver con las funciones elípticas. "Estos números —dice Borcherds, pasando unas ocho grandes



Reflexionando sobre el Monstruo, las cuerdas y el número 26 llegó Richard Borcherds a conseguir el máximo galardón de las matemáticas

páginas de apretados caracteres— componen la tabla de caracteres del Monstruo."

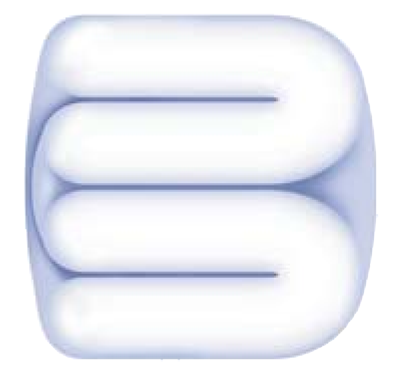
"Grupo simple Monstruo" es su nombre completo. Se trata del grupo simple, finito y esporádico más grande que se conoce. Para comprender lo que eso significa, sugiere que "pensemos en un antiguo griego que intentara conocer las simetrías de los objetos sólidos ordinarios. Encontraría que un cubo tiene 24 simetrías", esto es, que hay 24 maneras de darle vueltas de modo que quede con la misma apariencia. Esas simetrías constituyen un grupo finito de 24 elementos.

"Quizás construyera luego un tetraedro, que genera un grupo de 12 simetrías", continúa. "Y puede que se diera cuenta de que ninguno de los objetos geométricos que conocía tenía un número de simetrías múltiplo de cinco, aunque a lo mejor también se le ocurriría que tal objeto tenía que existir. Más tarde, otro pudo haber construido un dodecaedro (de 12 caras), que tiene 60 simetrías, probando que el primer personaje tenía razón."

A su vez, el grupo Monstruo, cuya existencia se predijo muchos años antes de que se llegara a construirlo de verdad, representa las simetrías de... de algo, pero los matemáticos no tenían ni idea de qué. Algo demasiado complicado como para llamarlo un simple objeto geométrico, puesto que vive no en tres dimensiones sino en 196.883. Y en 21.296.876 dimensiones, y en todas las dimensiones superiores que salen en la primera columna de la tabla de Borcherds.

Fuera lo que fuere, el objeto que daba lugar al grupo Monstruo debía de ser sobremanera simétrico, puesto que "el grupo tiene más elementos", calcula McKay, "que partículas elementales —quarks, electrones y demás— hay en el Sol": 808.017.424.794.512.875.886.459.904.961.710.757.005.754.368.000.000.000, para ser precisos.

Los grupos finitos tienen tan poco que ver con las funciones modulares que "cuando John McKay contó que el tercer coeficiente de la función *j* concordaba con las dimensiones más bajas del Monstruo le dijeron que estaba completamente loco", recuerda Borcherds. "Nadie podía imaginar conexión alguna." Pero al final otros se dieron cuenta de que las coincidencias eran tan profundas, que no se podían dejar de lado. "Resultó que *cada uno* de los coeficientes de la función modular es una simple suma de los números de la lista de dimensiones en las que vive el Monstruo." Conway y otros conjeturaron que las conexiones no eran en absoluto una coincidencia, sino que revelaban alguna unidad más profunda. Le pusieron a la conjetura el apelativo de "disparatada", y para probarla surgió una nueva especialidad matemática.



La rosquilla doblada en 26 dimensiones (aquí se simplifica a tres) que produce el grupo Monstruo tiene más de 10^{53} simetrías

Borcherds, mientras tanto, realizaba sin pena ni gloria su doctorado en Cambridge, mejorando su táctica en el juego del Go en vez de asistir a las clases, como él mismo dice. Pero algo debió de verle Conway, quien le escogió para que se las tuviese con la conjetura disparatada.

En 1989, tras ocho años de trabajo en el problema, en un autobús averiado, en Cachemira, mientras su mente sin duda vagaba por el universo alternativo de lo abstracto, encontró la tercera pieza del rompecabezas, la ligazón de las otras dos. Era la teoría de cuerdas —suena apropiado—, por mediación del número 26.

Los físicos han imaginado durante años diversas clases de cuerdas infinitesimales con la esperanza de explicar todo lo que hay en el universo mediante una sola teoría. La idea básica es que las partículas elementales no son tales, sino que están constituidas por aros de cuerda unidimensional.

Para llevar la cuenta de cómo operan las leyes de la naturaleza se venían dibujando diagramas de palotes desde hacía largo tiempo. Cada segmento representa el recorrido de una partícula, y es en las intersecciones, o vértices, donde interaccionan. "En teoría de cuerdas trabajan con pequeñas sortijas, no con puntos, de modo que los diagramas no constan de líneas sino de tubos conectados por algo de fontanería", explica Baez. "Las matemáticas usadas en las teorías de cuerdas describen lo que ocurre cuando estos tubos se encuentran" mediante la llamada álgebra de vértices.

Un aspecto desagradable de las teorías de cuerdas, señala Baez, es que "para hacer cálculos con ellas se necesita que algunas cosas se simplifiquen con otras, pero eso sólo ocurre con 24 dimensiones alrededor", dando un total de 26 (hay que contar el tiempo y la dimensión misma de la cuerda). "Eso no les acaba de gustar a los físicos", dice Borcherds. "Pero es justo lo que necesitaba yo para tratar con el Monstruo. Si la dimensión crítica de la teoría de cuerdas hubiera sido cualquier otra diferente de 26, no habría podido probar las conjeturas disparatadas."

Pero es 26 precisamente, así que pudo probarlas inventando su propia álgebra de vértices, las reglas, en resumen, de una teoría de cuerdas. "Esa álgebra de vértices", explica Baez, "describe una cuerda que se agita en un espacio de 26 dimensiones con la característica particular de que las 26 están enrolladas. Viene a ser como una diminuta rosquilla doblada sobre sí misma de la manera más resabiada, tal y como sólo es posible en esas 26 dimensiones".

La función *j,* claro, no trata sino de rosquillas complejas. Y como demostró Borcherds, el Monstruo es simplemente el grupo de todas las simetrías de esta teoría de cuerdas particular, una teoría, por cierto, que nada tiene que ver con el universo en que vivimos. Pero ahora es una zona bien explorada del universo alternativo donde Borcherds pasa la mayor parte de su tiempo.

Biología vegetal

Plantas y CO_2

Con periodicidad casi diaria se nos recuerda el efecto nocivo de las actividades humanas en el futuro del planeta con la emisión incesante de gases que fomentan el efecto invernadero. La concentración atmosférica de CO_2 aumenta a una velocidad de 1,8 mmol/mol por año. Si este ritmo se mantiene, la concentración de CO_2 actual (aproximadamente 360 mmol/mol) se duplicará hacia mediados del recién estrenado siglo XXI.

Demuestra la investigación que muchas plantas aumentan su velocidad de crecimiento, su tamaño y la biomasa que acumulan cuando se cultivan bajo elevadas concentraciones de CO_2. Pero han sido alteraciones más sutiles, como los cambios en el número de estomas inducidos por este gas, las que más han atraído la atención de los científicos durante los últimos años.

Los estomas (del griego "boca") son estructuras microscópicas presentes en la epidermis de las plantas terrestres, a través de las cuales se realiza la mayor parte del intercambio gaseoso entre el vegetal y la atmósfera. Están constituidos por dos células oclusivas cuyos cambios de forma provocan la apertura o el cierre de un poro. A través de estos poros estomáticos se produce la salida de H_2O y O_2 a la atmósfera y la entrada de CO_2 a los espacios aéreos de la planta.

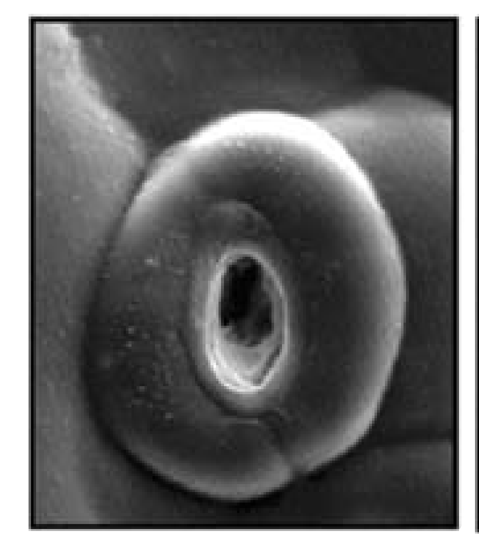
Las plantas terrestres han de captar suficiente CO_2 para realizar la fotosíntesis y, a la vez, minimizar la pérdida de agua por transpiración. En 1987, F. I. Woodward observó que, para lograr esa doble misión, reducían el número de estomas conforme iba aumentando la concentración de CO_2. Como el aumento de las concentraciones de CO_2 atmosférico incrementa la velocidad de difusión de este gas por el interior de la planta, disminuyendo el número de estomas las plantas amortiguan la pérdida de agua sin comprometer la adquisición de CO_2.

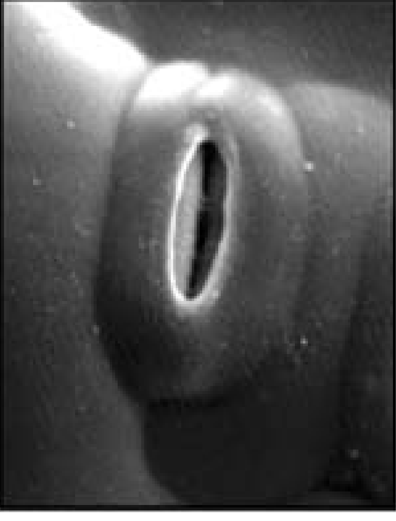
Woodward se hallaba en la Universidad de Cambridge estudiando pliegos de herbario de varias especies arbóreas. Descubrió que la densidad estomática de una determinada especie variaba en razón del momento en que se había recolectado: los individuos más antiguos tenían mayor densidad estomática que los recolectados en fechas más recientes. Ante esa comprobación, sospechó que tales diferencias fenotípicas podrían guardar relación con el incremento que la concentración de CO_2 había experimentado durante los últimos 200 años.

Confirmó su sospecha cultivando plantas en cámaras que mantenían concentraciones de CO_2 inferiores a la atmosférica. Pero fue más allá. Y demostró que, cuando estas plantas se cultivaban bajo concentraciones de CO_2 que superaban la actual, no se producían reducciones ulteriores en el número de estomas. Tras los trabajos pioneros de Woodward, decenas de experimentos con especies vegetales diversas han confirmado sus resultados.

El equipo de A. M. Hetherington, de la Universidad de Lancaster, ha iniciado la identificación de los mecanismos moleculares que subyacen bajo tamaña plasticidad fenotípica. De entrada, confirmaron que la densidad estomática de *Arabidopsis thaliana* no disminuía al aumentar los niveles de CO_2 por encima de los actuales, respaldando la hipótesis de Woodward: la respuesta de la densidad estomática a la concentración de CO_2 se encuentra saturada en la actualidad.

Pero el grupo de Hetherington ha avanzado un paso más. Han identificado el mutante *hic* (de "high carbon dioxide"), que se caracteriza por producir una densidad estomática superior a la de plantas silvestres cuando se cultivan bajo una concentración de CO_2 que duplica la concentración actual de este gas (de ahí el nombre). Esto significa que el producto del gen *HIC*, en el que este mutante es deficiente, impide que el número de estomas aumente cuando la con-





Los estomas son estructuras epidérmicas compuestas por dos células oclusivas. Los cambios operados en la forma de estas células permiten la apertura (a) *y el cierre* (b) *del poro estomático y, con ello, un controlado intercambio gaseoso entre la planta y la atmósfera*

centración de CO_2 dobla la actual. Así pues, el gen *HIC* de *A. thaliana*, y posiblemente genes homólogos en otras especies vegetales, podrían evitar un incremento del número de estomas en la futura atmósfera.

Un fallo en el funcionamiento de *HIC* produciría un aumento en el número de estomas, lo que facilitaría la pérdida de agua. En una situación de recursos hídricos limitados, esto comprometería la supervivencia de tales plantas.

Hetherington y su equipo han clonado el gen *HIC* y han descifrado su secuencia. Este gen, que se expresa sólo en las células oclusivas, muestra una alta homología con el gen *KSC1* de *A. thaliana*, que determina una 3-cetoacil CoA sintetasa. Estas enzimas participan en la síntesis de ácidos grasos de cadena larga, componentes esenciales de las ceras cuticulares que impregnan la epidermis vegetal. La naturaleza molecular de *HIC* sugiere que las mutaciones que inactiven este gen podrían producir alteraciones en la composición lipídica de la cutícula. Si tal ocurre, estas alteraciones explicarían el fenotipo del mutante *hic*.

Pero, ¿en virtud de qué los cambios operados en la composición lipídica de la cutícula se traducen en un incremento del número de estomas? Hetherington propone un modelo muy sencillo. Cuando la concentración de CO_2 es elevada, los estomas de las plantas silvestres producen un "factor hipotético" que se difunde por la cutícula, inhibiendo el desarrollo de estomas en todas las células que alcanza. Las probables alteraciones en la composición lipídica de la cutícula de las plantas mutantes dificultan la movilidad del factor y, consecuentemente, reducen su radio de acción. Esto se traduce en un incremento de la densidad estomática en el mutante *hic*. La idea de la "inhibición lateral" que subyace bajo este modelo fue avanzada hace ya más de 50 años por E. Bünning y H. Sagromsky, pero no en el contexto de la respuesta a altas concentraciones de CO_2.

No existen pruebas experimentales que pongan de manifiesto la actuación de estos factores hipotéticos durante el desarrollo de estomas. La verdad es que hay más preguntas que respuestas acerca del mecanismo en cuya virtud las plantas despliegan un número diferente de estomas ante diferentes concentraciones de CO_2, optimizando así el balance fotosíntesis/transpiración. ¿Cuál es el sensor que percibe la concentración de CO_2? ¿De qué modo ordena este sensor la producción del factor inhibidor y cuál es la naturaleza molecular del mismo? ¿Cómo se percibe este factor inhibidor y de qué modo se transfiere la información que suministra para impedir la formación de estomas? ¿Existen homólogos de *HIC* en otras especies vegetales?

Las respuestas a estas y otras preguntas permitirán comprender un mecanismo que podría desempeñar una función crucial a mediados de este siglo, si no tomamos las medidas necesarias para limitar las emisiones de CO_2.

LAURA SERNA
CARMEN FENOLL
Facultad de Ciencias
del Medio Ambiente
Universidad de Castilla-
La Mancha, Toledo

Infancia de las estrellas

Burbujas

Desde hace varios decenios se sabe que la infancia de las estrellas se caracteriza por la expulsión de materia en forma de "chorros" bipolares con velocidades de centenares de kilómetros por segundo.

Según los modelos teóricos, estas expulsiones bipolares de materia son una consecuencia esperada del propio proceso de formación estelar. Así, una estrella se va gestando por acrecimiento de material interestelar (gas y polvo), que se va acumulando en el centro debido a la fuerza de gravedad, creando el embrión estelar (protoestrella). Pero una parte de este material queda en rotación en torno a la protoestrella, formando un disco de gas y polvo que al final del proceso dará lugar a un sistema planetario en órbita alrededor de la estrella. Así se cree que ocurrió con nuestro propio sistema solar.

Debido a la acción combinada del disco de gas y polvo, y posiblemente del campo magnético existente, el material sobrante, en vez de caer sobre la estrella, se desvía de su trayectoria acelerado a grandes velocidades; sale expulsado por los polos, en dirección perpendicular al disco protoplanetario. De este modo se autorregula y se estabiliza la masa de la estrella que finalmente se formará en el centro. Sin embargo, parece que no siempre es así.

Recientemente, un equipo internacional, constituido por investigadores de España, Estados Unidos, México y Chile, hemos descubierto una burbuja esférica de vapor de agua en expansión, que rodea a una protoestrella en la constelación de Cefeo, situada a 2000 años luz de la Tierra.

Hemos podido detectar esta burbuja mediante la emisión máser de las moléculas de vapor de agua. ("Máser" es acrónimo de la expresión inglesa que se traduce por amplificación de microondas por emisión estimulada de radiación.) Esta emisión de vapor de agua genera en el cielo una estructura en forma de arco, que se ajusta a una circunferencia con una precisión de una parte entre mil. La interpretación física de este arco es que forma parte de una cáscara esférica, ya que sólo una esfera, vista desde un ángulo de visión arbitrario, daría como proyección en el cielo una circunferencia perfecta.

La burbuja, que se expande a una velocidad de 9 kilómetros por segundo, tiene un tamaño de 18.000 millones de kilómetros, comparable al de nuestro sistema solar. Aunque este tamaño es gigantesco para las escalas en que nos movemos en la Tierra, no deja de ser pequeño (su diámetro aparente es menor que 0,2 segundos de arco) cuando se compara con las enormes escalas de nuestra galaxia.

Hemos observado cómo era esta burbuja cuando habían transcurrido 33 años desde su expulsión. Y hemos percibido cambios en su evolución en sólo unos meses. Ambas



Distribución de los diez radiotelescopios que componen el interferómetro VLBA. Ilustración cortesía del Observatorio Radioastronómico Nacional de EE.UU.

escalas de tiempo son muy cortas en comparación con las escalas temporales de millones de años características de la evolución estelar.

Quizá lo más sorprendente, desde el punto de vista científico, es la esfericidad de esta burbuja en expansión, algo muy difícil de explicar con los actuales modelos teóricos de formación estelar que, como comentábamos anteriormente, predicen expulsiones bipolares colimadas. En el actual esquema de formación estelar no encaja el hecho de que una protoestrella aparezca inmersa en una burbuja esférica. Es posible que el objeto que hemos encontrado constituya un caso excepcional, pero si resulta que esta etapa de expulsión de materia con simetría esférica ocurre frecuentemente en otras estrellas en formación, habrá que revisar las teorías vigentes.

Habrá que esperar nuevas observaciones para determinar si se trata de un fenómeno habitual o si constituye una rareza en la infancia de las estrellas. En cualquier caso, habrá que encontrar un mecanismo físico que explique, al menos para este caso, por qué un objeto que nace rodeado de un medio altamente inhomogéneo puede expulsar una burbuja de materia capaz de mantener una simetría tan perfecta. En su evolución futura, esta burbuja probablemente acabe fragmentándose y dispersándose, pero es sorprendente que haya logrado mantener su esfericidad hasta alcanzar su tamaño actual.

El descubrimiento de este singular fenómeno se ha realizado con el dispositivo de muy larga base ("Very Long Baseline Array", VLBA) del Observatorio Radioastronómico Nacional de EE.UU. de la Fundación Nacional para la Ciencia de EE.UU. El VLBA es un radiointerferómetro compuesto por diez radiotelescopios (cada uno de 25 metros de diámetro), situados uno en Hawai, otro en St. Croix (Islas Vírgenes) y los ocho restantes en el continente norteamericano (*véase la ilustración*). Los diez radiotelescopios, guiados por control remoto, apuntan hacia la misma región del cielo. Los datos recogidos se graban en cintas magnéticas especiales y más tarde se combinan en un ordenador. La enorme distancia que hay entre los radiotelescopios permite alcanzar resoluciones angulares de hasta 0,4 milisegundos de arco, una resolución angular doscientas veces mejor que la que obtiene el telescopio espacial Hubble.

J. F. Gómez
Laboratorio de Astrofísica Espacial y Física Fundamental (Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial),
G. Anglada
Instituto de Astrofísica de Andalucía (CSIC),
J. M. Torrelles
Instituto de Estudios Espaciales de Cataluña (CSIC)

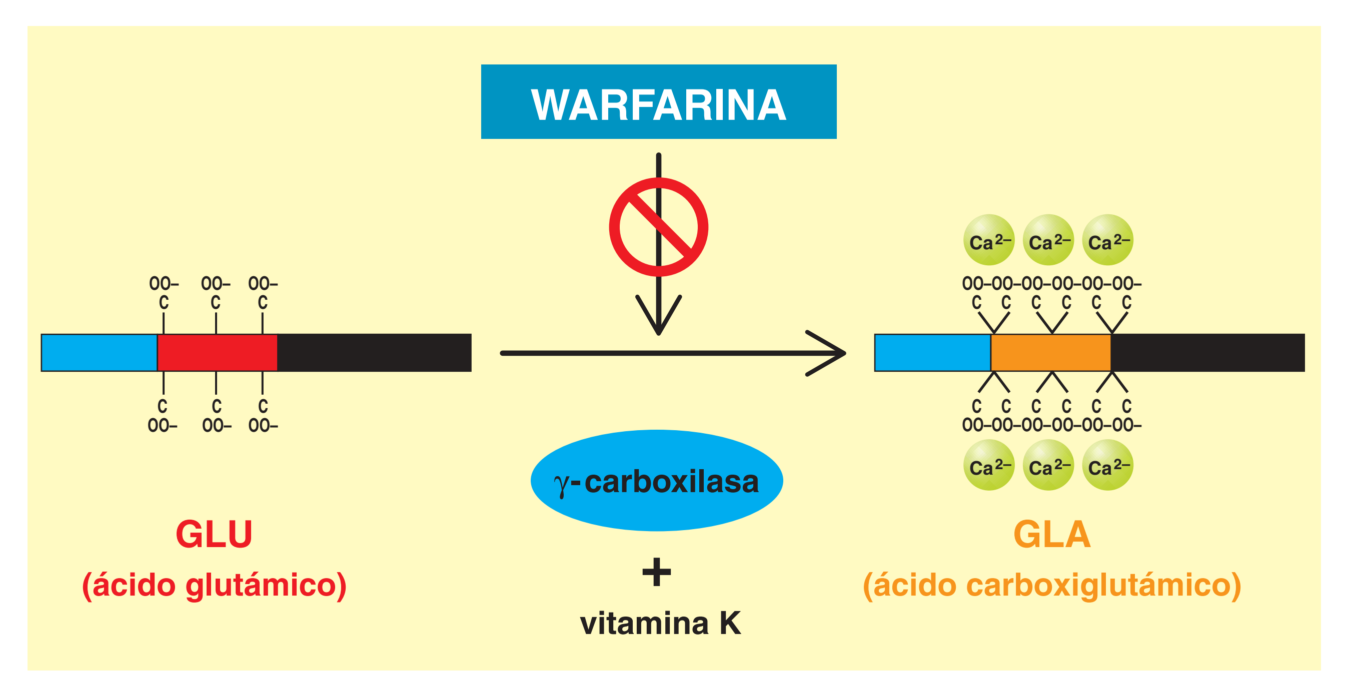
Terapia antitrombótica

Una nueva proteína

¿Qué tienen en común la osteoporosis, la formación de un coágulo sanguíneo y la parálisis mortal producida por el veneno de ciertas conchas marinas? Por de pronto, en todos esos procesos intervienen proteínas cuya función depende de la vitamina K.

La vitamina K es un cofactor enzimático. Cataliza la carboxilación de residuos específicos de ácido glutámico (Glu) en determinadas proteínas. La adición de un segundo grupo carboxilo transforma el ácido glutámico en ácido carboxiglutámico (Gla), un aminoácido con propiedades especiales para interaccionar con iones de calcio.

En el hombre se conocen 10 proteínas dependientes de vitamina K. Dos, de dispar arquitectura, están en el hueso; se trata de la osteocalcina y la proteína Gla de matriz (MGP). Las ocho restantes presentan muchas estructuras comunes e intervienen en los procesos de activación de la coagulación (fac-



1. Así funciona la vitamina K. La carboxilasa, una enzima, modifica las proteínas dependientes de vitamina K. En efecto, reconoce una secuencia del extremo de la proteína (azul) *y cambia los residuos de glutámico en la región contigua* (rojo)*. Entre 6 y 11 residuos se trasforman en carboxiglutámico* (naranja)*, lo que les confiere propiedades de unión a iones calcio* (verde)*. La warfarina y el dicumarol, anticoagulantes, bloquean el proceso*

tor VII, IX y X, y protrombina) o de inactivación de la misma (proteína Z, proteína C y proteína S).

Para las diez proteínas resulta determinante la unión con iones calcio. A través de la misma se anclan en membranas activadas (las plaquetarias, por ejemplo) o en las de células en apoptosis (moribundas). Así engarzadas en las membranas, cumplen mejor su función, pues sobre las membranas se ensamblan los componentes requeridos para la coagulación de la sangre.

La importancia de la vitamina K se refleja en su asociación con algunas patologías. Ciertas mutaciones en el factor IX de la coagulación, proteína dependiente de la vitamina K, causan la hemofilia B. La mayoría de las mutaciones relacionadas con la trombosis venosa producen deficiencias en la proteína S y proteína C o en sus sustratos.

Para tratar tales enfermedades trombóticas se indican fármacos que imitan a la vitamina K, aunque privados de su actividad cofactora. La warfarina, por ejemplo, inhibe la formación de Gla y reduce la actividad de todas las proteínas dependientes de vitamina K. Esto se traduce en menos capacidad de coagular la sangre, lo que evita la formación de nuevos trombos. Pero la terapia tiene que estar muy bien calculada: si la capacidad de coagular es demasiado baja, se desencadenan hemorragias, tanto o más peligrosas que los coágulos venosos.

Gas6 ha sido la última adición a este grupo de proteínas dependientes de vitamina K. La descubrió Claudio Schneider, entonces en el Laboratorio Europeo de Biología Molecular en Heidelberg, al buscar proteínas que se sintetizan específicamente en células que están en fase estacionaria, esto es, cuando no hay división celular.

Aunque se había observado su capacidad antiapoptótica en cultivos celulares, se desconocía qué función desempeñaba en el organismo. A diferencia de las otras proteínas de su familia, Gas6 no se encontraba en plasma. Tampoco afectaba a la coagulación de la sangre en los tests de laboratorio. Para descifrar cuál podría ser su función, en nuestros grupos de la Universidad de Lund y de la Católica de Lovaina creamos un ratón deficiente en Gas6 (un ratón “knockout” para Gas6).

En un principio, estos ratones no presentaban ninguna disfunción aparente que nos pudiese indicar qué fallaba en ausencia de Gas6. Pero si tratábamos a los animales privados de esta proteína con sustancias que activan la coagulación sanguínea, no formaban trombos con la facilidad de los animales normales.

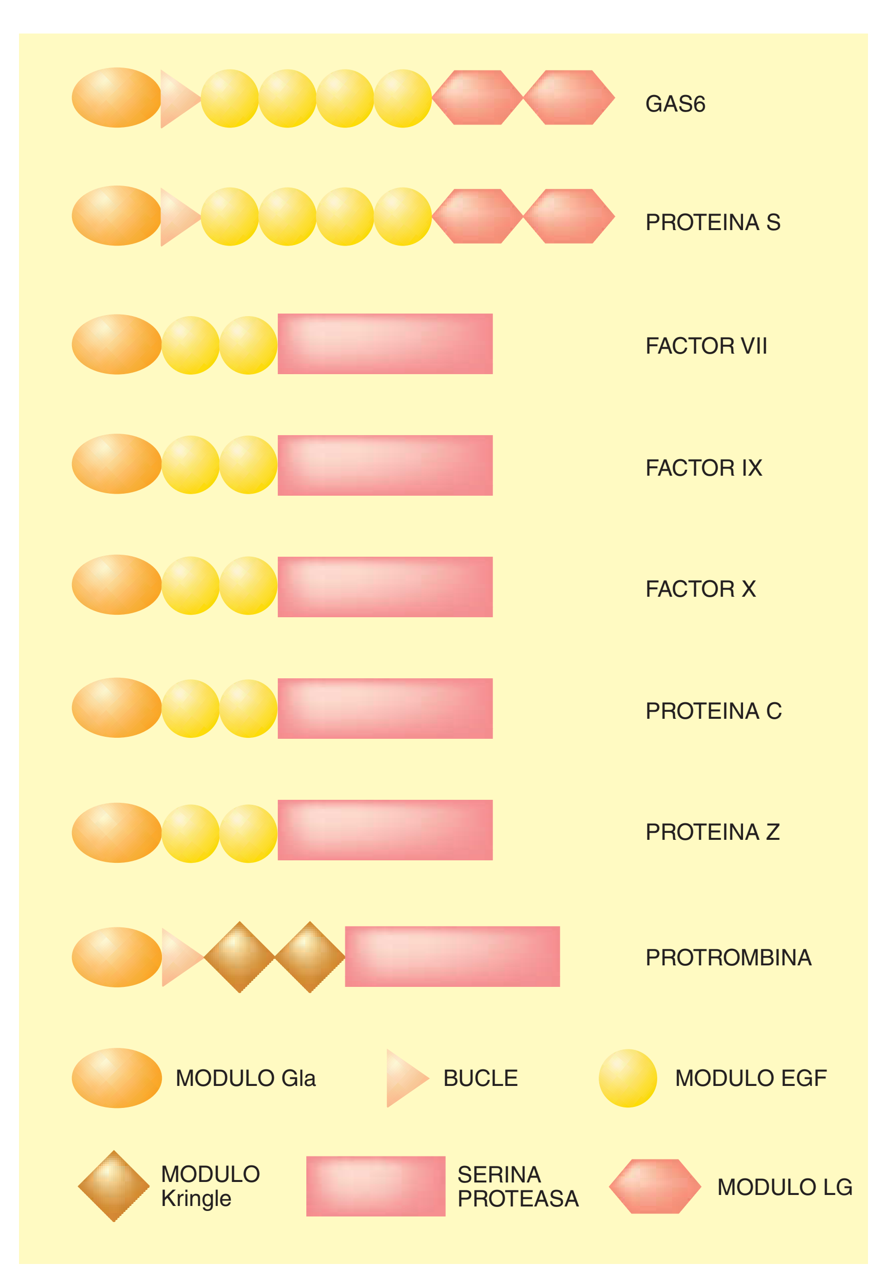
Analizamos las fases del proceso trombogénico. Y observamos que las plaquetas y el endotelio que recubre los vasos sanguíneos se activan con mayor presteza en presencia de Gas6. Se requiere la activación de estas células para enviar las primeras señales que instan la formación de un coágulo. Habíamos dado con la función de Gas6: como otras proteínas dependientes de vitamina K, es también un regulador de la coagulación, pero posee un peculiar mecanismo de acción. A diferencia de las demás proteínas de su familia, Gas6 no actúa principalmente sobre la formación de la malla de fibrina, el componente que confiere rigidez al coágulo. Antes bien, opera sobre las células que promueven la coagulación, permitiendo que éstas pasen de un estado inactivo a un estado apto

para la activación de la cascada de la coagulación.

Reprodujimos el mismo efecto anticoagulante observado en los ratones KO inhibiendo la función de Gas6 en un ratón normal. Para la inhibición utilizamos anticuerpos contra Gas6. Los anticuerpos reconocen a la proteína Gas6 y bloquean su función. Además, esa inhibición farmacológica no inducía hemorragias, efecto colateral de otros tratamientos contra la formación del trombo. Dicho de otro modo, queda abierta la posibilidad de inhibir la función coagulante de Gas6 mediante medicinas específicas, que actuarían como antitrombóticos con menores riesgos de efectos indeseados.

La presencia de Gas6 en la pared de los vasos le convierte en un candidato para afectar otros procesos del sistema cardiovascular. Por eso estamos seguros de que Gas6 será objeto de futuras investigaciones biomédicas. Y quizá la base de nuevas estrategias terapéuticas.

PABLO GARCÍA DE FRUTOS
Laboratorio
de Investigaciones Biomédicas.
Hospitales Universitarios
Virgen del Rocío (Sevilla)



2. Las vitaminas dependientes de vitamina K de la sangre están formadas por estructuras independientes (módulos). Hasta el momento se conoce la existencia de ocho. Todas empiezan por el módulo con los residuos de Gla que les confiere la propiedad de unirse a membranas. Obsérvese la identidad estructural entre proteína S y Gas6

Cáncer de piel

La función de la telomerasa

Los cromosomas eucariotas terminan en una estructura especial, el telómero. Consta de repeticiones en tándem de una secuencia corta de ADN, los nucleótidos TTAGGG en vertebrados, y de proteínas asociadas.

Corresponde a los telómeros proteger los extremos de los cromosomas frente a actividades enzimáticas de degradación, recombinación y reparación de ADN. Pero esa función propia puede verse amenazada. En primer lugar, por la pérdida de secuencias teloméricas con la edad o el número creciente de divisiones celulares; en segundo lugar, por la pérdida de función de ciertas proteínas estructurales asociadas (la proteína TRF2, de “telomere repeat factor 2”, encargada de mantener los bucles teloméricos), y, en tercer lugar, por la pérdida de proteínas de los complejos de reparación de daño en el ADN (proteínas del complejo de reparación ADN-PK).

En cualquiera de esos tres casos, la pérdida consiguiente de función de los telómeros comporta un aumento de la inestabilidad cromosómica, que se manifiesta en fusiones terminales, y una disminución de la viabilidad celular. Las células disponen de mecanismos para compensar la pérdida de secuencias TTAGGG de los telómeros. ¿Cuáles?

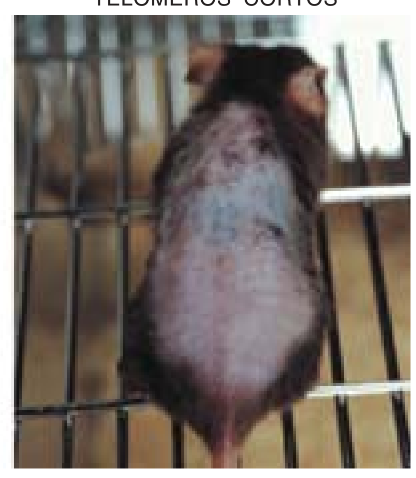
El mecanismo principal estriba en la actividad de la telomerasa. Esta enzima es una transcriptasa inversa que consta de una subunidad catalítica, o Tert (“telomerase

SILVESTRES

SIN TELOMERASA



SIN TELOMERASA
TELOMEROS CORTOS



Imágenes representativas de ratones de estirpe silvestre y ratones deficientes para telomerasa con telómeros largos (G2) o con telómeros críticamente cortos

reverse transcriptase"), y de una molécula de ARN, o Terc ("telomerase RNA component"), que contiene el molde para la síntesis de nuevas secuencias teloméricas.

La merma de secuencias teloméricas vinculada a la edad se explica por la caída de actividad telomerasa en los tejidos adultos. Se le considera uno de los mecanismos desencadenantes del envejecimiento del organismo. En una situación antagónica, las células tumorales tienen altos niveles de actividad telomerasa y mantienen los telómeros incluso bajo una intensa presión proliferativa.

Apoyados en esa última observación, se ha postulado que la inhibición de telomerasa en tumores podría convertirse en un método eficaz para bloquear el crecimiento del tumor. Además, la inhibición de la telomerasa no tendría efectos secundarios, pues atañería a las células tumorales, no a las normales. Y varios investigadores han demostrado que la inhibición de la telomerasa en líneas celulares tumorales produce un acortamiento rápido de los telómeros y pérdida de viabilidad. Se ha comprobado, además, que se requiere la activación de la telomerasa para transformar una célula normal en tumoral, lo que avala el uso de inhibidores de telomerasa en el tratamiento del cáncer.

Por ingeniería genética se obtuvieron ratones privados de actividad telomerasa. Merced a ese logro pudo elucidarse el papel de la telomerasa y de los telómeros en enfermedades asociadas al envejecimiento caracterizadas por agotamiento de la capacidad proliferativa de las células. En la reintroducción de actividad telomerasa en tejidos normales se confía para una posible terapia génica de tales patologías.

Además, el estudio de los animales deficientes en actividad telomerasa ha permitido establecer la importancia del acortamiento de los telómeros en el cáncer. En particular, se ha observado que los animales sin telomerasa y con telómeros cortos oponen mayor resis tencia a la aparición de tumores.

En los experimentos realizados con animales deficientes en telomerasa se ha utilizado el modelo de carcinogénesis química de la piel. Consiste en la inducción de papilomas y carcinomas (no melanomas) mediante la aplicación de carcinógenos y posterior promoción con mitógenos.

Mientras que los animales de la estirpe silvestre desarrollan numerosos papilomas y carcinomas tras el tratamiento, los animales sin telomerasa que tienen telómeros cortos (animales de las últimas generaciones sin telomerasa) son prácticamente resistentes a la aparición de papilomas. Los pocos papilomas que se desarrollan en animales sin telomerasa y con telómeros cortos son menores de 4 mm y desaparecen tras la finalización del tratamiento; los papilomas de animales de la estirpe silvestre pueden llegar a medir más de 2 cm y continúan creciendo hasta la formación de carcinomas.

De tales resultados se desprende que la ausencia de actividad telomerasa y el consiguiente acortamiento telomérico actúan como un mecanismo supresor de tumores en la piel; dicho de otro modo, los inhibidores de telomerasa serían eficaces en el tratamiento del cáncer. Aunque la investigación se ha centrado en el cáncer de piel, podría ampliarse a otros tipos de tumores sólidos.

Además, el estudio de ratones sin telomerasa, aunque con telómeros largos (animales sin telomerasa de las primeras generaciones), nos permitió determinar que la ausencia de actividad telomerasa, por sí sola, ejercía un efecto negativo en la aparición de papilomas en la piel, ya que estos animales mostraron una reducción del 30 % en el número de papilomas en la piel. Nos sugieren tales datos que la activación de la telomerasa, que ocurre en más del 90 % de todos los tipos de tumores, supone una ventaja proliferativa para las células del tumor, aun cuando los telómeros son suficientemente largos.

MARÍA A. BLASCO
Dpto. de Inmunología
y Oncología
Centro Nacional de Biotecnología
(CSIC), Madrid

DE CERCA

Texto y fotos: Sergio Rossi

De lenteja a placa: la formación de la banquisa



1. Rodeado por la banquisa en diferentes fases de formación, el rompehielos alemán Polarstern recoge muestras para su investigación oceanográfica realizada a bordo

En ambos polos, aumenta y disminuye la banquisa siguiendo un vaivén anual. Esta placa de hielo característica mide unos 1,5 m de espesor en verano y unos 2,5-3 m en invierno. Lo mismo el crecimiento que la reducción de su potencia provocan profundos cambios en la comunidad que habita la columna de agua (y, por ende, en la que vive del plancton). Al licuarse el hielo, penetran luz y nutrientes. Asistimos entonces a una fuerte reacción en el fitoplancton que, con su explosión productiva, favorece que el resto de los organismos pueda, directa o indirectamente, alimentarse, reproducirse y crecer. Es un lapso de tiempo breve (en determinadas zonas sólo dura unas pocas semanas), pero muy intenso.

Cuando llega el otoño, antes de la congelación invernal, el hielo adopta formas peculiares. Empieza por constituirse en lentejuelas, origina luego una suerte de galletas (o pancakes), antes de unirse en anchas placas para integrar, por último, una capa gruesa. Al final, el hielo así formado poseerá una salinidad de aproximadamente un 10 ‰ o menos. En su parte inferior se acumulan nutrientes, aprovechados por algas microscópicas. Les llega a éstas, no obstante el espesor de la placa, luz suficiente para continuar en su actividad. Se crea un ambiente restringido a esa parte del hielo, donde encontramos también eufausiáceos (krill), copépodos y otros herbívoros. En la parte superior, la mayoría de los organismos que viven de la pesca (focas, pingüinos o ballenas) migran al paso del crecimiento de la placa; es decir, hacia fuera de los polos. Este desplazamiento durará hasta la primavera, cuando el deshielo les ofrezca de nuevo la oportunidad de volver hacia el interior.

2. No tarda en formarse un granizado (agua en fase de congelación). Del mismo empiezan a salir las "lentejas" o lentes de hielo



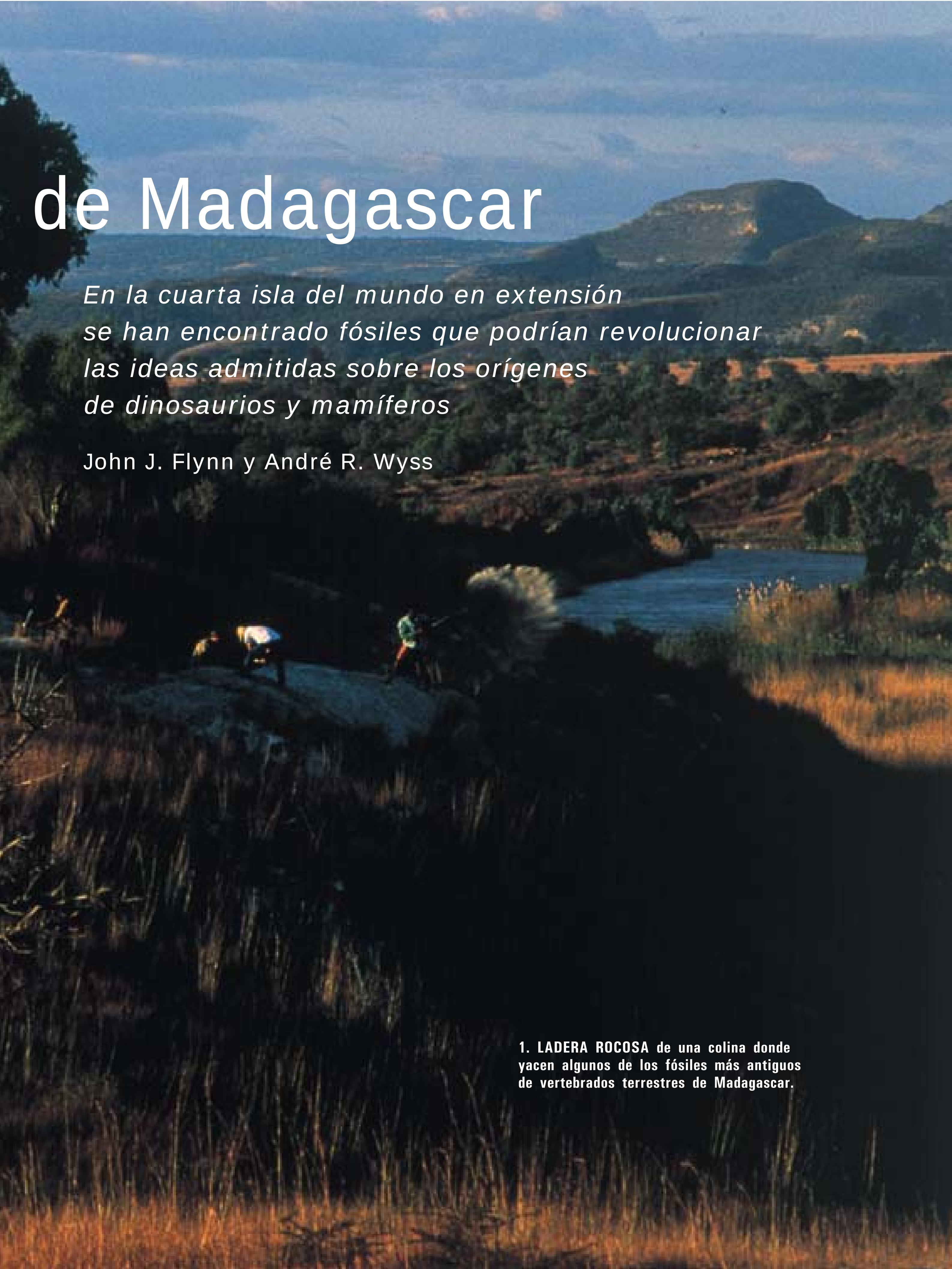
3. Las "lentejas" se convierten en "galletas". Van creciendo de forma cuasicircular hasta constituir un inmenso banco que se pierde en el horizonte

4. Por último, los bordes de las "galletas" entran en contacto. La conexión frena su errático movimiento hasta quedar bloqueadas y formar la banquisa propiamente dicha

5. Para seguir el comportamiento de las galletas, un grupo británico se sirvió de estas curiosas boyas. El aparato imita el movimiento de una "galleta". En efecto, la boya se deja a la deriva, conectada por satélite, para que emita datos de temperatura, viento y desplazamiento. Gracias a la elaboración de los resultados entenderemos mejor la dinámica de formación de la placa de hielo

Reptiles y mamíferos del Mesozoico





de Madagascar

En la cuarta isla del mundo en extensión se han encontrado fósiles que podrían revolucionar las ideas admitidas sobre los orígenes de dinosaurios y mamíferos

John J. Flynn y André R. Wyss

1. LADERA ROCOSA de una colina donde yacen algunos de los fósiles más antiguos de vertebrados terrestres de Madagascar.

Fue en 1996 cuando emprendimos nuestra primera campaña en Magadascar. Llevábamos en la isla tres semanas ya buscando fósiles y sólo habíamos cosechado algunos dientes y huesos dispersos. Cierto era que el terreno accidentado y las dificultades logísticas no facilitaban la labor. Pero cuando la campaña se acercaba a su fin, dimos con una pista muy prometedora en el oriente meridional de la isla. En el mapa turístico del centro de información del Parque Nacional de Isalo se señalaba un paraje llamativo: "lugar de huesos de animales". Dos jóvenes lugareños nos guiaron.

Nuestras ilusiones no tardaron en desvanecerse. Los fragmentos de esqueleto corroídos y esparcidos por la ladera de la colina pertenecían al ganado que pastaba y a otros animales actuales. Aquel sitio, si bien de potencial interés para los arqueólogos, no parecía esconder la presa, mucho más antigua, tras la que nosotros íbamos. Avanzado el día, otro guía nos condujo a un segundo paraje con huesos desparramados. Allí descubrimos dos fragmentos de mandíbula del tamaño de un pulgar, cuya antigüedad era palmaria. Pertenecían a rincosaurios, parientes con pico de loro de los dinosaurios, extinguidos hace mucho tiempo.

Los huesos de rincosaurio resultaron ser el preludio anticipador de un rosario espectacular de hallazgos prehistóricos. Desde entonces, la cuarta isla del mundo, por su extensión, se ha convertido en una prolífica fuente de información sobre los animales que deambulaban durante el Mesozoico, el período de la historia de la Tierra (transcurrido hace entre 250 y 65 millones de años) en que aparecieron dinosaurios y mamíferos. Hemos desenterrado los huesos de dinosaurios primitivos que sospechamos son los más antiguos de cuantos se conocen. Y se ha desatado la polémica en torno a otro hallazgo nuestro: el de un animal parecido a la musaraña que, por encontrarse en el hemisferio "equivocado", pone en cuestión la tesis oficial sobre la historia de los mamíferos. Esos especímenes singulares, entre otros muchos recogidos a lo largo de cinco campañas, nos han permitido pergeñar un cuadro provisional del Madagascar mesozoico.



2. NI REPTIL NI MAMIFERO, se trata de un traversodóntido. Del tamaño de un leopardo, poseía unos poderosos incisivos y unos dientes anchos supramandibulares, que utilizaba para cortar y triturar las plantas cuando pacía en Madagascar, hace unos 230 millones de años.

A lo largo de los dos últimos decenios hemos dedicado buena parte de nuestra investigación a la reconstrucción de la historia de los animales terrestres que habitaban el hemisferio sur. Movidos por un mismo empeño otros paleontólogos se han centrado en yacimientos fosilíferos de Sudáfrica, Brasil, la Antártida y la India. ¿Por qué elegimos nosotros Magadascar en vez de ahondar en lugares ya reconocidos? Aunque hay en la isla extensos depósitos con rocas del Mesozoico, sólo se había descubierto allí un puñado de fósiles de vertebrados terrestres de esa época. Intuimos que no se había buscado con la tenacidad necesaria para sacar a la luz cuanto escondían.

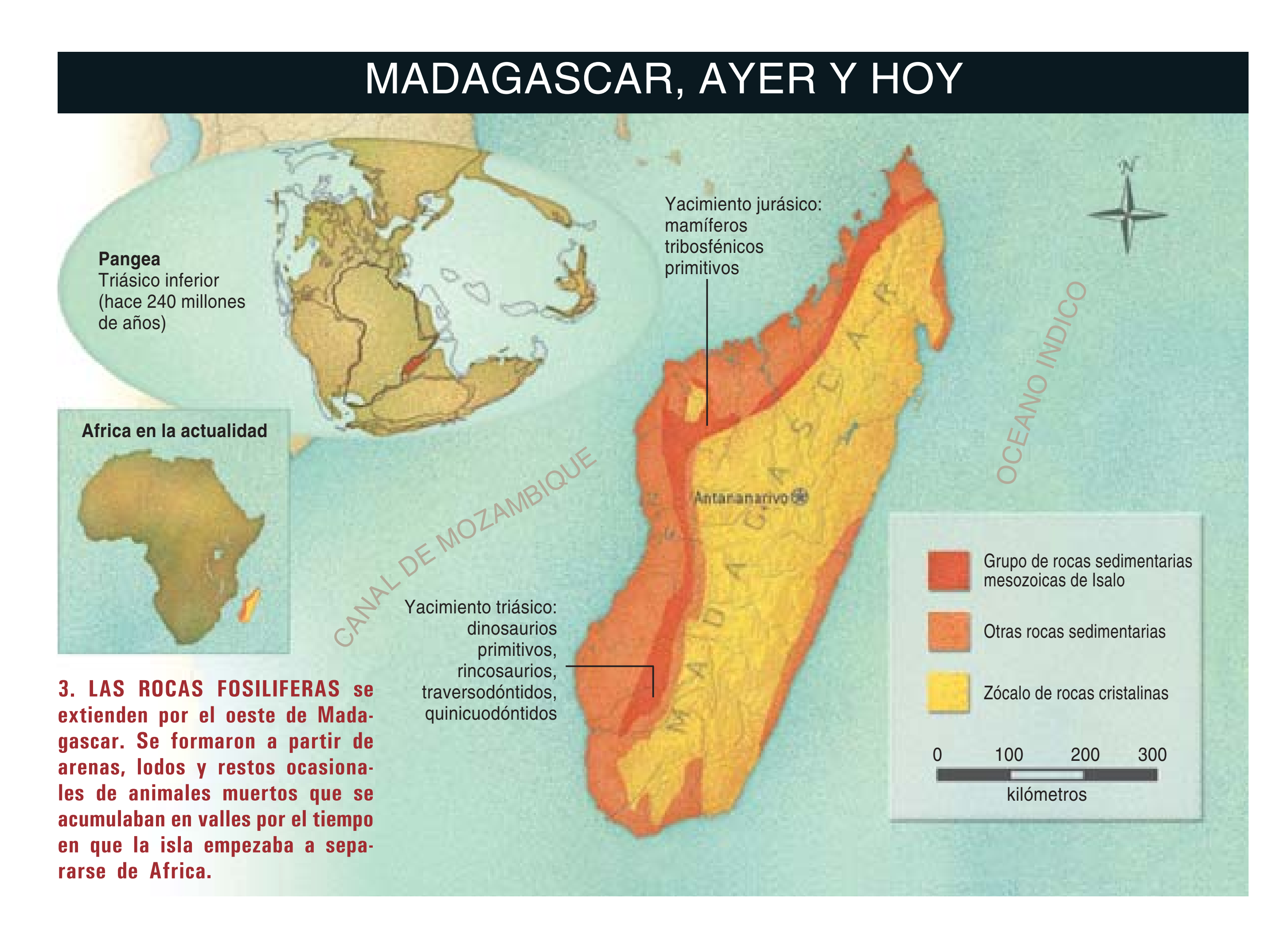
La persistencia se convirtió en nuestro lema cuando emprendimos la campaña de 1996. Una docena de científicos y estudiantes procedentes de los Estados Unidos y de la Universidad malgache de Antananarivo componían nuestro equipo. Entre otras ventajas, la colaboración con la principal universidad del país nos facilitaba la adquisición de permisos de trabajo y de expedición de los especímenes, requisito éste importante en paleontología de campo. Hubo que afrontar varios obstáculos logísticos, que sin duda contribuyeron a nuestros primeros fracasos. Los depósitos mesozoicos del oeste de Madagascar abarcan una superficie de unos 390.000 kilómetros cuadrados. Con el tiempo, los carros de bueyes han ido abriendo algún camino, que, con los senderos, constituyen la única vía de llegar a zonas más remotas. En su mayoría, sin embargo, resultan intransitables incluso para los vehículos más potentes de tracción en las cuatro ruedas. Tuvimos que transportar desde la capital los víveres (arroz, judías y carne en conserva). La insuficiencia de combustible restringía nuestra movilidad. Hasta los incendios, frecuentes y descontrolados, llegaron a interrumpir nuestro trabajo. Por no hablar de contingencias imprevistas que nos obligaban a reajustar los planes sobre la marcha.

Acontecimientos fortuitos

La decisión de por dónde empezar la prospección en una región tan vasta fue quizás el obstáculo mayor. Para nuestra fortuna, no partíamos de cero a la hora de planear la investigación. El trabajo de campo pionero del geólogo Henri Besairie, quien dirigió el Ministerio de Minas de Madagascar a mediados del siglo XX, nos proporcionó mapas a gran escala del sustrato rocoso del Mesozoico de la isla. Merced a esos estudios sabíamos de una combinación fortuita de factores geológicos que determinó la acumulación de un grueso manto de sedimentos en las tierras bajas del oeste: una poderosa razón para sospechar de la presencia, en esa zona, de huesos y dientes fósiles.

En los albores de la era Mesozoica, 250 millones de años atrás, se podía haber caminado desde Madagascar hasta casi cualquier otra parte del mundo. Todas las masas continentales del planeta se encontraban unidas en el supercontinente Pangea; Mada-

MADAGASCAR, AYER Y HOY



3. LAS ROCAS FOSILIFERAS se extienden por el oeste de Madagascar. Se formaron a partir de arenas, lodos y restos ocasionales de animales muertos que se acumulaban en valles por el tiempo en que la isla empezaba a separarse de Africa.

gascar yacía entre la costa occidental de lo que hoy es la India y la costa oriental del Africa actual. La Tierra era bastante más caliente que en el presente; ni siquiera había hielo en los polos. En Gondwana, la región meridional del supercontinente, discurrían ríos enormes hacia cuencas de tierras bajas que terminarían por convertirse en el canal de Mozambique, entre Madagascar y Africa Oriental, que abarca ahora 250 millas.

Estas cuencas gigantes representan el límite de la fosa geológica que se creó a medida que Madagascar empezó a apartarse de Africa, hace más de 240 millones de años. Este proceso verosímilmente destructivo de hundimiento ("rifting") constituye un mecanismo de acumulación de fósiles sumamente eficaz. (De hecho, muchos de los principales yacimientos fosilíferos de vertebrados se sitúan en antiguas zonas de desgarre tectónico, incluido el famoso registro de los primeros pasos de la evolución humana en las cuencas de rift del este de Africa, mucho más recientes en comparación.) Los ríos que fluían por las cuencas arrastraban lodos, arena y a veces cadáveres o huesos de animales muertos. Con el tiempo, los ríos depositaron ese material en una secuencia de capas enormes. Un desgarre tectónico persistente y una creciente acumulación de sedimentos ocasionaron un mayor hundimiento del suelo de las cuencas. Este proceso de deposición continuó durante aproximadamente 100 millones de años, hasta que los fondos de las cuencas, cada vez más delgados, alcanzaron el punto de ruptura; desde el interior del planeta ascendieron rocas fundidas que rellenaron el hueco formando una nueva corteza oceánica.

Hasta ese momento, la naturaleza había proporcionado a Madagascar tres ingredientes cruciales para la conservación de los fósiles: organismos muertos, depresiones para su enterramiento (las cuencas de rift) y material para recubrirlos (arena y lodos). Pero se requerían también unas condiciones especiales para asegurar la integridad, siquiera parcial, de los fósiles a lo largo de los 160 millones de años subsiguientes. De nuevo, las circunstancias geológicas resultaron benevolentes. Conforme las masas continentales

Los autores

JOHN J. FLYNN y ANDRE R. WYSS, en una colaboración que dura ya dos decenios, han realizado diversas campañas paleontológicas en las Montañas Rocosas, Baja California, los Andes chilenos y Madagascar. Flynn, docente en la Universidad de Chicago, ocupa la cátedra MacArthur de mamíferos fósiles en el Museo Field de la capital de Illinois. A esta última institución se halla asociado Wyss, quien da clases de geología en la Universidad de California en Santa Bárbara.

de Africa y Madagascar, recién separadas, se iban distanciando, las zonas litorales cargadas de sedimento apenas si experimentaron erupciones volcánicas u otros episodios que hubieran desintegrado los fósiles. Decisivo también para la conservación de éstos resultó ser que las antiguas cuencas de rift terminaran en el lado occidental de la isla, en la actualidad ocupado por manchas de bosques secos, pastizales y matorral del desierto. En un ambiente más húmedo, tales sedimentos se habrían erosionado o bien habrían permanecido escondidos bajo una densa vegetación, como la que prolifera a lo largo de la costa oriental de la isla.

En un principio Madagascar permaneció unido a las otras masas continentales de Gondwana: la India, Australia, la Antártida y Sudamérica. No alcanzó la insularidad hasta que se escindió de la India, hace unos 90 millones de años. En algún momento posterior, la isla adquirió el conjunto de extraños animales actuales, siendo los lémures los más conocidos. A lo largo de más de un siglo la ciencia se ha venido preguntando desde cuándo habitan la isla esos organismos y por cuánto tiempo vivieron allí sus antepasados. De los descubrimientos de otro equipo de paleontólogos se infiere que casi todos los grupos principales de vertebrados actuales llegaron a Madagascar en las postrimerías de la era Mesozoica, 65 millones de años atrás. Nuestras excavaciones se centraban en un intervalo más antiguo de la historia de Madagascar: los dos primeros períodos del Mesozoico.

Un descubrimiento provechoso

Entre las ventajas que reporta trabajar en un terreno poco explorado se cuenta la de la trascendencia científica que suele adquirir cualquier hallazgo. Aconteció con nuestros primeros descubrimientos en los aledaños del Parque Nacional de Isalo. La misma tarde del año 1996 que encontramos los fragmentos de mandíbula de rincosaurio, Léon Razafimanantsoa, alumno de la Universidad de Antananarivo, recuperó un cráneo de 15 centímetros de longitud perteneciente a otro animal de importancia paleontológica. Se trataba, lo vimos enseguida, de un herbívoro peculiar, ni mamífero ni reptil: un cinodonto traversodóntido.

Las mandíbulas del rincosaurio y el extraordinario cráneo del traversodóntido —nuestros primeros descubrimientos significativos del proyecto internacional en curso— dieron un nuevo impulso a la campaña. El primer fósil siempre es el más difícil de encontrar; podíamos ya acometer un trabajo exhaustivo de recolección, necesario para empezar a juntar las piezas que conformarían una imagen del pasado. Las areniscas blancas que estábamos excavando se habían formado a partir de la arena arrastrada por los ríos que discurrían por las tierras bajas de un Madagascar unido a Africa. Por esos valles prehistóricos los rincosaurios y traversodóntidos, animales tetrápodos de entre uno y tres metros de longitud, seguramente pacían juntos a la manera que observamos ahora en cebras y ñus de Africa. La presencia de rincosaurios, bastante común en rocas coetáneas de todo el mundo, acotaba la fecha de esa imagen a un tiempo incluido en el período Triásico (el primero de los tres intervalos del Mesozoico), hace entre 250 y 205 millones de años. Puesto que los traversodóntidos ofrecían una mayor diversidad y cuantía durante la primera mitad del Triásico que durante la segunda, pensamos en un principio que el escenario se enmarcaría en torno a hace algo más de unos 230 millones de años.

Recolección de huesos minúsculos

Los paleontólogos han de habérselas con incendios, parásitos y temperaturas abrasadoras mientras buscan fósiles de mamíferos

Kate Wong

La expedición, formada por tres land rovers, se detiene. John Flynn consulta su GPS. Conocida la posición exacta, avanza, a través del matorral, por un camino de carro. Hemos salido a las siete de la mañana de Antananarivo, la capital de Madagascar. Ahora, caída la tarde, con el azul del cielo fundiéndose en rosa y malva, buscamos un lugar donde acampar. Montamos las tiendas en un claro, cerca de un villorrio. Mañana empieza el trabajo de verdad.

Conforman el equipo siete malgaches y seis estadounidenses, dirigido por los paleontólogos Flynn, del Museo Field de Chicago, y André Wyss, de la Universidad de California en Santa Bárbara. Han venido a este lugar remoto del noroeste de Madagascar a la caza de fósiles de los primeros mamíferos. En una campaña anterior habían observado sedimentos rojos y parduscos del Jurásico, el intervalo de tiempo (hace aproximadamente entre 205 y 144 millones de años) durante el cual aparecieron los mamíferos. Entre los fósiles desenterrados, una mandíbula minúscula de enorme trascendencia científica.

De acuerdo con la tesis tradicional, los precursores de los mamíferos placentarios y marsupiales modernos surgieron en el hemisferio norte hacia el final del Jurásico. Esa doctrina se basa en las edades y emplazamientos de los primeros restos de especímenes, parecidos a musarañas, que se caracterizan por sus molares tribosfénicos. Pero



El mamífero *Ambondro mahabo,* de diez centímetros de longitud, vivía en Madagascar hace unos 167 millones de años.

la mandíbula de Madagascar, que Flynn y Wyss han atribuido a un nuevo género y especie, *Ambondro mahabo*, posee dientes tribosfénicos y vivió hace unos 167 millones de años, en el Jurásico Medio. Por lo tanto, su fósil sugiere que los mamíferos tribosfénicos surgieron por lo menos 25 millones de años antes de lo supuesto y, posiblemente, en el hemisferio austral, no en el septentrional.

Nadie ha puesto en duda la edad de *A. mahabo*, pero no todos aceptan que los mamíferos tribosfénicos se originaran en el sur. A ese respecto, Zhexi Luo, experto en fósiles de mamíferos del Museo Carnegie de Historia Natural de Pittsburgh, y varios más han sugerido que *A. mahabo* y un fósil animal igualmente sorprendente de Australia llamado *Ausktribosphenos nyktos* podrían representar una segunda línea de mamíferos tribosfénicos, la que dio origen a los ovíparos monotremas. Flynn y Wyss replican que algunos de los caracteres que esos investigadores utilizan para relacionar los mamíferos tribosfénicos del sur con los monotremas pueden ser semejanzas primitivas que no implicarían un parentesco evolutivo especialmente estrecho.

Como tantos otros debates en paleontología, la controversia sobre cuándo y dónde aparecieron estos grupos de mamíferos primitivos tiene que ver con la escasez de huesos conocidos. Si se recuperaran más ejemplares de *A. mahabo* o restos de mamíferos todavía no descritos se consolidaría la tesis de Flynn y Wyss, apoyada en un solo caso, sobre el origen en el hemisferio sur de los antepasados de los placentarios y marsupiales actuales.



El fragmento de mandíbula de *A. mahabo* del Jurásico presenta unos molares especializados, exclusivos de los mamíferos tribosfénicos.

A la mañana siguiente, la expedición se abre paso entre pastizales, camino del yacimiento de fósiles donde se trabajó el año pasado. Grupos de palmas dum y espinosos árboles mokonazy salpican el paisaje resecado por una estación dura. Cuando llegamos a nuestro destino, el frescor agradable de la mañana ha dado paso a un calor abrasador. A mediodía el termómetro marca los 32 grados centígrados.

Flynn da instrucciones al grupo para que empiece a trabajar al pie de la ladera. Mientras tanto, él y Wyss inspeccionarán el área alrededor en busca de nuevas exposiciones del horizonte que contiene los fósiles. Con leznas en la mano y los ojos a corta distancia del suelo, se rastrea la superficie cubierta de gravas en busca de huesos pequeños, indicios de que a mayor profundidad se preservan los delicados fósiles de mamíferos. Debido a que los restos de los mamíferos primitivos son tan diminutos (el fragmento mandibular de *A. mahabo*, por ejemplo, tiene una longitud de apenas 3,6 milímetros), esa inspección raramente reporta una gratificación inmediata. Por eso el equipo recoge sedimentos donde se sospecha que se hallan los fósiles deseados y los envía a EE.UU. para su examen ulterior, más detallado. Al cabo de unas horas aparecen una vértebra minúscula y un fragmento de fémur: son indicios de que se ha dado con un filón prometedor.

In situ, los sedimentos, recogidos en bolsas, se lavan en cestos y cedazos en una charca cercana. A pesar del calor achicharrador, los que trabajan dentro del agua deben calzarse botas de goma y guantes para protegerse contra los parásitos que pueblan el agua estancada, verde y sucia. Wyss extiende el concentrado resultante en una gran lona de plástico azul para que se seque. Más adelante, en el Museo Field de Chicago, se examinará con lupa. Aunque los ojos de Wyss parecen acostumbrados, no era evidente a simple vista que se pudiera rescatar de allí el preciado *A. mahabo*.

A la interrupción para el almuerzo, sigue un breve descanso pare reponer fuerzas. Pero hoy la naturaleza nos ha reservado una sorpresa. Un incendio forestal se viene aproximando hacia nosotros, impulsado desde el noreste por un fuerte viento. Al paso del incendio unas garcillas bueyeras se dan un banquete de insectos asados; las aves de presa hacen círculos en lo alto acechando a los roedores que huyen de las llamas. Sólo nos separa del fuego el riachuelo, pero Flynn y Wyss, reacios a abandonar el lavado y tamizado, deciden aguardar. Semejantes incendios proliferan en Madagascar. Provocados a menudo por ganaderos para fomentar el crecimiento de pasto nuevo, a veces se propagan descontrolados, especialmente en las regiones polvorín del noroeste.

Una hora más tarde, las llamas se han apagado y el equipo regresa al riachuelo para terminar el tamizado. Las orillas, antes cubiertas de una gruesa capa de hierba seca, aparecen desnudas y chamuscadas. Ante el peligro de que el viento se levante de nuevo, nos dirigimos hacia otro yacimiento para excavar el resto de la tarde. A las seis termina la jornada de trabajo. De vuelta en el campamento, Flynn y Wyss anotan los acontecimientos del día y catalogan los ejemplares de interés.

El hallazgo de un tercer tipo de animal, durante nuestra segunda campaña, en 1997, puso en entredicho los tiempos teóricos que habíamos delimitado. Poco después de llegar al sudoeste de Madagascar, un lugareño de nombre Mena, ayudante nuestro de campo, nos mostró unos huesos que había encontrado al otro lado del río de nuestras anteriores inspecciones. Nos llamó la atención la roca roja de grano fino adherida a los huesos; cuanto hasta entonces habíamos hallado estaba enterrado en areniscas blancas de grano grueso. Mena nos condujo hasta un profundo barranco, unos 800 metros al norte del yacimiento del rincosaurio y del traversodóntido. En pocos minutos reconocimos en aquellas honduras el estrato de acumulación de huesos donde habían quedado atrapados animales tan peculiares. En el estrato de rocas arcillosas rojas de un metro de espesor yacía sepultada una gran concentración de fósiles. Las arcillas

rojas se habían formado en las llanuras aluviales de los mismos ríos que en el pasado habían depositado las arenas blancas. La excavación reportó alrededor de dos docenas de especímenes de lo que parecían ser dinosaurios. Había mandíbulas, vértebras, caderas, garras, un antebrazo articulado con algunos huesos de la muñeca y otros elementos del esqueleto. Cuando examinamos con mayor detenimiento estos y otros huesos, comprendimos que habíamos puesto al descubierto los restos de dos especies distintas de prosaurópodos (no mencionados hasta el momento), uno de los cuales muestra cierto parecido con el *Azendohsaurus* de Marruecos. Estos prosaurópodos, que por regla general aparecen en rocas de una edad comprendida entre los 225 y los 190 millones de años, son los precursores, de un tamaño menor, de los dinosaurios saurópodos de cuello largo, en cuyo grupo se incluyen *Brachiosaurus* y otros gigantes.

Con el descubrimiento de que los restos de dinosaurios forrajeaban entre rincosaurios y traversodóntidos, se hizo evidente que habíamos desenterrado una colección de fósiles cuya coexistencia no se daba en ningún otro lugar. Al aparecer los dinosaurios, los traversodóntidos merman en número y diversidad en Africa, Sudamérica y otras regiones del mundo. De modo similar, el tipo más común que recuperamos de rincosaurio, el *Isalorhyncus*, carece de caracteres avanzados, de lo cual se deduce que es más antiguo que el grupo de rincosaurios que se encuentra con otros dinosaurios primitivos. Más aún, el repertorio de fósiles de Madagascar no contiene restos de varios grupos reptilianos más jóvenes que suelen hallarse junto con los dinosaurios iniciales, entre los que destacan los pesados y acorazados fitosaurios y aetosaurios, parecidos a cocodrilos. La coexistencia de dinosaurios con otros tipos de animales más antiguos, unida a la falta de grupos más recientes, sugiere que la antigüedad de los prosaurópodos de Madagascar iguala a la de los dinosaurios conocidos, si no la supera.



4. INSPECCION MINUCIOSA del terreno. Flynn (*derecha*) y William Simpson se aseguran de no pasar por alto ni el más mínimo hueso.

Sólo un yacimiento de dinosaurios primitivos, el argentino de Ischigualasto, presenta un estrato rocoso que pudo datarse directamente; su edad radioisótopica se estimó en torno a los 228 millones de años; se supone, pues, que el resto de los yacimientos de dinosaurios con fósiles similares no superarán esa antigüedad. (La edad radioisotópica sólo se determina de forma fiable en los estratos rocosos producidos por volcanes coetáneos. Los sedimentos de Madagascar, en cambio, se acumularon en cuencas de sedimentación sin volcanes en las proximidades.) Basados en los fósiles encontrados, propusimos como hipótesis de partida que nuestras rocas con restos de dinosaurios precedían ligeramente al período datado en Ischigualasto. Y puesto que los prosaurópodos representan una de las principales ramas del árbol evolutivo de los dinosaurios, cabe inferir que el antepasado común de todos ellos ha de ser más antiguo todavía. Aunque se han obtenido muestras relativamente buenas de rocas anteriores a los 245 millones de años en distintas partes del mundo, en ninguna de ellas se han recogido restos de dinosaurios. Esto significa que la búsqueda del antepasado común de todos los dinosaurios debe centrarse en rocas pertenecientes a un período bastante obscuro, cercano al Triásico Medio, hace entre 240 y 230 millones de años.

Mamíferos, sobre todo

Los dinosaurios atraen la atención. Se trata de los animales terrestres más espectaculares del Mesozoico. No goza de la misma consideración un hecho notable: mamíferos y dinosaurios aparecieron en la escena evolutiva prácticamente al mismo tiempo. Culpables de la falsa idea extendida de que los mamíferos sólo emergieron tras la extinción de los dinosaurios son dos factores, por lo menos: uno es que todos los mamíferos primitivos tenían un tamaño igual o inferior al de las ardillas listadas. El otro factor es que el registro fósil de los primeros mamíferos, sin contar el del Mesozoico muy tardío, es bastante disperso. Madagascar colmaba de nuevo dos lagunas misteriosas del registro fósil. Una: los cinodontos traversodóntidos de los sedimentos de Isalo revelan nuevos detalles sobre los parientes cercanos de los mamíferos; la otra: un fósil más reciente de la parte noroeste de la isla plantea algunas cuestiones controvertidas sobre dónde y cuándo surgiría un grupo clave y avanzado de mamíferos.

Los traversodóntidos de Madagascar, los primeros que se conocieron en la isla, incluyen algunos de los representantes mejor conservados de cinodontos primitivos que se han descubierto hasta la fecha. (Bajo el nombre "Cynodontia" se ampara el amplio grupo de animales terrestres donde se encuadran mamíferos y sus parientes más próximos.) Por consiguiente, estos huesos aportan una abundante información anatómica acerca de esos animales de la que se carecía hasta entonces. Estos cinodontos se identifican, entre otros caracteres de diagnóstico, por su simplificada mandíbula inferior dominada por un único hueso, el dentario. De algunos especímenes se han conservado



VIVIENDO EN COMPAÑIA

Hasta hace poco los paleontólogos desconocían que el grupo peculiar de animales pretéritos que se muestran arriba —prosaurópodos (*1*), traversodóntidos (*2*), rincosaurios (*3*) y quinicuodóntidos (*4*)— compartieron el mismo espacio. En los últimos seis años, el sudoeste de Madagascar se ha convertido en el primer lugar donde se han desenterrado huesos de cada uno de estos tipos de animales, asociados, en este caso en rocas del Triásico de unos 230 millones de años. La región era entonces una cuenca de llanuras exuberante, que se iba formando cuando el supercontintente Pangea empezó a dividirse. En la ilustración, los prosaurópodos de cuello largo, que representan algunos de los dinosaurios más antiguos descubiertos hasta ahora, se alimentan de coníferas, mientras un rincosaurio con pico de loro se prepara para beber de una charca cercana. Los dientes de los prosaurópodos, en sierra y lanceolados, eran apropiados para cortar ramajes; los rincosaurios constituían quizás el grupo más corriente de herbívoros de la zona en ese tiempo. Estos reptiles imponentes forrajeaban entre traversodóntidos y quinicuodóntidos, dos grupos que se numeran entre los primeros Cynodontia. A ese nutrido taxón pertenecen los mamíferos actuales. Los dientes supramandibulares, trituradores, de los traversodóntidos abonan la hipótesis de una dieta herbívora; en cambio los quinicuodóntidos ostentan los dientes afilados y puntiagudos, propios de los carnívoros.

cráneo y esqueleto. El conocimiento de su morfología completa es fundamental para resolver la compleja transición evolutiva desde los grandes animales de sangre fría, cubiertos de escamas y de extremidades desgarbadas (que dominaban en los continentes antes del Mesozoico), hasta los animales mucho menores, de sangre caliente, cubiertos de pelo y de postura erecta, tan abundantes hoy en día.

En el presente habitan en nuestro planeta numerosos tipos de mamíferos, con muchas variaciones anatómicas. Pero todos ellos comparten un antepasado común dotado de un conjunto único y distintivo de caracteres. Para determinar qué aspecto tenían esos mamíferos primitivos, los paleontólogos deben examinar a sus parientes más cercanos —desde la óptica de la evolución— entre los Cynodontia, que incluyen a los traversodóntidos y a sus primos mucho menos comunes, los quinicuodóntidos (o probainognatos), ambos encontrados en el sudoeste de Madagascar. Los traversodóntidos eran herbívoros; se desprende de la presencia de dientes anchos, aptos para triturar. Una de las cuatro especies de traversodóntido descritas por nosotros en Madagascar muestra también unos incisivos grandes, fuertes y proyectados hacia delante para cortar las hojas. Por el contrario, los quinicuodóntidos eran carnívoros, a tenor de sus dientes afilados y puntiagudos. Muchos paleontólogos coinciden en que algunos quinicuodóntidos comparten con los mamíferos un antepasado común más reciente que el que comparten los traversodóntidos herbívoros. Los cráneos y esqueletos de quinicuodóntido hallados en Madagascar contribuirán a establecer el vínculo entre los cinodontos primitivos y los mamíferos genuinos.

Situados entre los cinodontos mejor conservados del mundo, los del Triásico de Madagascar nos introducen en un intervalo temporal escasamente conocido en otras partes. Lo mismo ocurre con los fósiles más recientes que nuestras campañas han sacado a la luz en una región del noroeste donde los sedimentos tienen una edad aproximada de 165 millones de años (fecha incluida en el Jurásico, el segundo de los tres períodos del Mesozoico). Dado que esos sedimentos eran notablemente más recientes que nuestras rocas del Triásico, teníamos la esperanza de encontrar allí restos de algún mamífero antiguo. Aunque no se disponía de un solo registro de mamíferos en rocas jurásicas de continentes del hemisferio sur, ello no nos arredró.

Una vez más, la persistencia dio sus frutos. Durante la campaña de 1996 visitamos el pueblo de Ambondromahabo, pues habíamos oído hablar de la abundancia de fósiles pertenecientes al dinosaurio saurópodo *Lapperentosaurus*. No es raro que en los depósitos de grandes animales se descubran, aunque no tan fácilmente, restos de animales chicos. Peinamos el terreno, casi arrastrándonos, con los ojos fijados a corta distancia del suelo. Este trabajo incómodo, pero a la larga productivo, nos recompensó con unos cuantos dientes pequeños de dinosaurio terópodo, escamas de peces y otros fragmentos de huesos, todos ellos acumulados en la superficie de un pequeño terraplén de sedimentos en las cercanías del pueblo.

Sugerían tales fósiles anodinos que podrían yacer enterrados, a mayor profundidad, ejemplares más significativos. Introdujimos en bolsas unos 100 kilogramos de sedimento y, llegados a la capital, Antananarivo, lo cernimos con la ayuda de sombreros de tela mosquitera, a la espera de que nos concedieran los permisos para la segunda etapa de nuestro viaje, la que nos llevaría al sudoeste, donde descubrimos las mandíbulas de rincosaurio y el cráneo de traversodóntido.

Durante los años siguientes, de nuevo en los EE.UU., mientras investigábamos el material excepcional del Triásico, se acometió el proceso, tedioso, de separación del sedimento del Jurásico. Dennis Kinzig, Ross Chisholm y Warren Valsa, del Museo Field de Chi-

Cuestiones pendientes

Madagascar es famoso por sus 40 especies de lémures, únicas en todo el mundo. También son exclusivos de la isla el 80 por ciento de las plantas y otros animales que la habitan. Esta singularidad biótica refleja un prolongado aislamiento geográfico. (Madagascar se desgajó de la India hace 90 millones de años. Setenta millones de años antes se había separado de Africa, su vecino actual más cercano.) Pero durante decenios, el exiguo registro fósil de los animales que allí vivieron impidió avanzar en el pobre conocimiento sobre el origen y evolución de esas criaturas únicas.

Mientras nuestro grupo sondeaba las rocas triásicas y jurásicas de Madagascar, equipos dirigidos por David W. Krause, de la Universidad estatal de Nueva York en Stony Brook, desenterraban nuevos fósiles más recientes en la región noroeste de la isla. Esos ejemplares, cuya edad se cifra en unos 70 millones de años, incluyen más de tres docenas de especies, ninguna de las cuales presenta un parentesco estrecho con los animales actuales de la isla. De lo que se infiere que la mayoría de los grupos de vertebrados actuales debieron haber inmigrado a Madagascar después de esa fecha.

Aunque Africa es la mejor situada para reclamar el origen de la fauna de Madagascar, la fauna actual difiere, de una forma notable, de la isla al continente. No parece que los elefantes, los felinos, los antílopes, las cebras y muchos otros mamíferos africanos llegaran nunca a Madagascar. Los cuatro grupos de mamíferos terrestres que habitan hoy la isla —roedores, lémures, carnívoros y los tenrec, semejantes a erizos— descienden, según todos los indicios, de animales africanos mucho más antiguos. Sin embargo, todavía permanece en la oscuridad la ruta que siguieron dichos inmigrantes desde el continente. Unos animales pequeños podrían haber arribado, flotando desde Africa a través del canal de Mozambique, adheridos al ramaje desprendido durante tormentas fuertes. O de forma alternativa, cuando el nivel del mar era inferior estos pioneros habrían viajado por tierra y mar a través de una cadena montañosa al noroeste de la isla, en la actualidad sumergida.

Para resolver esa cuestión, estamos analizando el ADN de mamíferos actuales de Madagascar, junto con Anne D. Yoder, de la facultad de medicina de la Universidad del Noroeste, y otros colaboradores. Los resultados podrían revelar si los antepasados de los mamíferos actuales de la isla llegaron en episodios múltiples de dispersión de larga distancia o en un episodio único de “salto de islas”.

cago, se ocuparon del examen, al microscopio, del sedimento concentrado, en busca de fragmentos minúsculos de huesos o dientes que encerraran alguna significación paleontológica. Nos habíamos casi olvidado de ese sedimento, cuando en 1998 Kinzig nos comunicó que había descubierto el fragmento de una mandíbula con tres dientes trituradores, todavía en su sitio; pertenecía a un mamífero minúsculo. No sólo nos sorprendió la presencia de la mandíbula, sino también la avanzada evolución de los dientes. La forma de éstos da fe del ejemplo más arcaico de Tribosfénidos, un grupo que abarca la inmensa mayoría de los mamíferos actuales. Denominamos a la nueva especie *Ambondro mahabo*, en homenaje a su lugar de origen.

El descubrimiento retrotrae, en más de 25 millones de años, el período geológico de este grupo y arroja la primera luz sobre la evolución de los mamíferos en los continentes meridionales durante la segunda mitad del período Jurásico. También indica que el grupo puede haber evolucionado en el hemisferio sur, y no en el septentrional según postula la tesis mayoritaria. Aunque la información disponible no resuelve de forma concluyente la cuestión, esta importante aportación al registro de los mamíferos primitivos fósiles pone de manifiesto la precariedad de algunas ideas basadas en un registro fósil históricamente sesgado hacia el hemisferio norte.

Un proyecto abierto

Aunque nuestro equipo ha recuperado en Madagascar fósiles de muy amplio espectro, la ciencia apenas ha empezado a describir la historia mesozoica de los continentes meridionales. El número de especies de vertebrados terrestres del Mesozoico hallados en Australia, la Antártida, Africa y Sudamérica es probablemente de un orden de magnitud inferior a la cuantía de los descubrimientos contemporáneos del hemisferio norte. Sin la menor duda, Madagascar representa hoy una de las fuentes más prometedoras de información para profundizar en el conocimiento paleontológico de la fauna de Gondwana.

A menudo las hipótesis más significativas sobre la historia de la vida en la Tierra sólo pueden plantearse a raíz de la aparición de nuevos fósiles. Las investigaciones de nuestro equipo aportan dos nuevos considerandos: los fósiles encontrados junto a los prosaurópodos del Triásico indican que los dinosaurios vivieron antes de lo que se conocía por registros precedentes; la presencia de mamíferos minúsculos en nuestros yacimientos del Jurásico implica que los mamíferos tribosfénicos pudieron surgir en el hemisferio austral, no en el septentrional. Nada mejor para corroborar estas hipótesis (o demostrar su falsedad) que regresar y desenterrar más huesos. Por eso el principal objetivo de nuestra próxima campaña volverá a ser, por sexta vez, el de encontrar el máximo número de fósiles posible.

Nuestro programa prevé excavar a mayor profundidad en los yacimientos ya conocidos y explorar regiones nuevas, en una suerte de compromiso entre el esfuerzo arriesgado y la apuesta segura. Pero aunque preparemos cuidadosamente nuestros planes, éstos se hallarán sujetos a cambios de última hora, impuestos por obstáculos tales como caminos cerrados o el más grave peligro hasta la fecha: la construcción de nuevos asentamientos.

En las tres primeras campañas no atendimos a las gravas que cubren los afloramientos rocosos del Triásico en la zona sudoriental de la isla. Ignorábamos que contuvieran zafiros. En 1999, se contaban por decenas de miles los buscadores de piedras preciosas. Al año siguiente, todos nuestros campos triásicos de trabajo se reclamaron para beneficio del mineral. Se han cerrado para todos, paleontólogos incluidos, a menos que se consiga un permiso de las entidades propietarias y del gobierno.

Aun sin tales obstáculos logísticos que frenan la investigación, se necesitarían varias generaciones de paleontólogos para inspeccionar con minuciosidad todos los afloramientos rocosos. Pero quienes hemos sido premiados con el descubrimiento de algunos tesoros de Madagascar, sentimos el apremio por continuar excavando en la esperanza de encontrar secretos escondidos.



5. LA JORNADA DE EXCAVACION dura hasta el atardecer. Flynn (*derecha*) y Wyss regresan al campamento, en el sudoeste de Madagascar.

Bibliografía complementaria

MADAGASCAR: A NATURAL HISTORY. Ken Preston-Mafham. Prologado por Sir David Attenborough. Facts on File, 1991.

NATURAL CHANGE AND HUMAN IMPACT IN MADAGASCAR. Dirigido por Steven M. Goodman y Bruce D. Patterson. Smithsonian Institution Press, 1997.

A MIDDLE JURASSIC MAMMAL FROM MADAGASCAR. John J. Flynn, J. Michael Parrish, Berthe Rakotosaminimanana, William F. Simpson y André R. Wyss en *Nature*, vol. 401, págs. 57-60; 2 de septiembre, 1999.

A TRIASSIC FAUNA FROM MADAGASCAR, INCLUDING EARLY DINOSAURS. John J. Flynn, J. Michael Parrish, Berthe Rakotosaminimanana, William F. Simpson, Robin L. Whatley y André R. Wyss en *Science*, vol. 286, páginas 763-765; 22 de octubre, 1999.

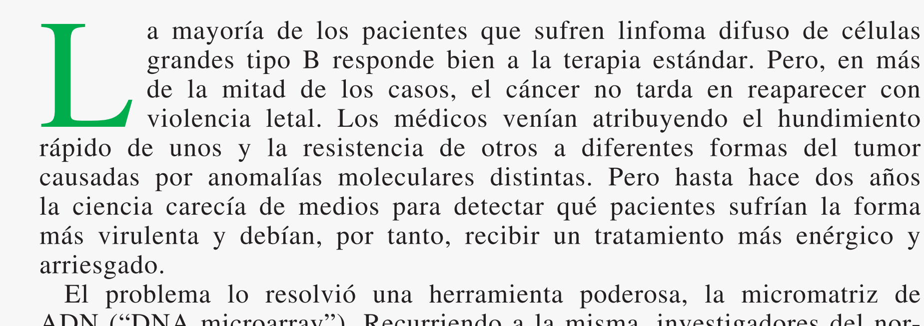
Micromatrices de ADN

Con unas ingeniosas herramientas de investigación llamadas micromatrices de ADN ("microarrays" si nos dejamos llevar por el anglicismo al uso), la ciencia se está adentrando en las raíces moleculares de la salud y la enfermedad, al tiempo que acelera el paso en el descubrimiento de nuevos fármacos. Merced a esas plantillas podría también adelantarse el día en que los tratamientos uniformes de las enfermedades se sustituyan por terapias personalizadas

Stephen H. Friend
y Roland B. Stoughton



CUANDO SE ANALIZAN muestras de tejido con matrices de ADN, aparecen tramas de puntos. Los médicos podrían basarse en las diferencias individuales entre estas tramas para ajustar sus tratamientos a las necesidades de cada paciente.



La mayoría de los pacientes que sufren linfoma difuso de células grandes tipo B responde bien a la terapia estándar. Pero, en más de la mitad de los casos, el cáncer no tarda en reaparecer con violencia letal. Los médicos venían atribuyendo el hundimiento rápido de unos y la resistencia de otros a diferentes formas del tumor causadas por anomalías moleculares distintas. Pero hasta hace dos años la ciencia carecía de medios para detectar qué pacientes sufrían la forma más virulenta y debían, por tanto, recibir un tratamiento más enérgico y arriesgado.

El problema lo resolvió una herramienta poderosa, la micromatriz de ADN ("DNA microarray"). Recurriendo a la misma, investigadores del norteamericano Instituto Nacional de la Salud, la Universidad de Stanford y otros centros pudieron distinguir entre supervivientes a corto y a largo plazo. Basábanse para ello en las diferencias observadas en el patrón general de actividad que mostraban cientos de genes de sus células malignas en el momento del diagnóstico. Aquel logro debería llevar a una prueba discriminante, capaz de identificar a los pacientes expuestos a un riesgo mayor.

Las micromatrices de ADN existen en el comercio desde 1996. Constituyen hoy uno de los pilares de la investigación farmacológica. Más de 20 compañías se dedican a su distribución o a la venta de los programas informáticos asociados. Gracias a esas plantillas asistimos a una revolución en el modo en que se estudia el funcionamiento molecular, normal y patológico, de las células. En ellas se confía para obtener diagnósticos más rápidos y exactos de muchas enfermedades, así como para facilitar la personalización de los tratamientos clínicos, lo que implica elegir los fármacos más eficaces y con menores efectos secundarios en cada paciente.

Punteados de identificación

Aunque hay varias clases de micromatrices, todas se ordenan a descubrir la composición del material genético en una muestra de tejido. Todas las variedades constan de una serie de moléculas de ADN unicatenario (sondas), dispuestas en una rejilla a menudo no mayor que la huella del pulgar. Las plantillas en cuestión se fundan en una propiedad muy útil del ADN: el emparejamiento complementario de sus bases.

De ADN están formados los más de 30.000 genes de la célula humana, las secuencias codificadoras de la composición de las proteínas. El ADN consta de cuatro bloques de construcción, reconocidos por la primera letra de sus bases químicas: A, C, G y T. En una cadena de ADN la base A sólo se emparejará con una T (la complementaria de A) de otra cadena; la C hará lo propio con G.

Por tanto, si una molécula de ADN de una muestra de tejido se une a una sonda que tiene la secuencia ATCGGC, deduciremos que la muestra presenta la secuencia complementaria: TAGCCG. El otro ácido nucleico fundamental, el ARN, sigue también esta estricta norma de emparejamiento de bases cuando se une al ADN; podemos, pues, deducir también la secuencia de una cadena de ARN que se empareja con ADN en una micromatriz.

Las reacciones de emparejamiento complementario de las bases han resultado cruciales para la ejecución de numerosas pruebas biológicas durante años. Pero lo asombroso de nuestro caso es que las micromatrices de ADN pueden rastrear decenas de miles de estas reacciones a la vez en una sola tarjeta. ¿En virtud de qué? Porque cada una de las sondas —trátese de un gen o de una secuencia de código más corta— se dispone en un lugar determinado de la rejilla, parecida a un tablero de ajedrez, y porque las moléculas de ADN o de ARN que se vierten sobre la plantilla portan un marcador fluorescente u otra etiqueta que puede detectarse con un escáner. Una vez leída la micromatriz por el escáner, los datos se convierten en una impresión con un código de colores.

En el dominio de la investigación las micromatrices de ADN se aplican a dos usos muy distintos. Las aplicaciones genotípicas comparan el ADN de una microplantilla con el ADN de una muestra de tejido para determinar qué genes hay en la muestra o para descifrar el orden de las letras de código en cadenas de ADN sin secuenciar. Además de ese uso explorador de la presencia de genes en una muestra, importa otro, el de detectar la expresión, o nivel de actividad, de tales genes. Se dice que un gen se expresa cuando se transcribe en un ARN mensajero (ARNm) y se traduce en una proteína. Las moléculas de ARN mensajero son los transcriptos móviles de los genes y sirven de molde para la síntesis de proteínas.

A la caza de genes

Se recurre al enfoque genotípico para comparar los genes de organismos diferentes (por ejemplo, para buscar claves sobre la historia de la evolución de los organismos) y para cotejar los genes de los tumores con los de tejidos normales (en busca de sutiles diferencias de composición o número de genes). Algún día, las comparaciones de genes mediante micromatrices de ADN podrán mostrar su valor en clínica.

Sin ir más lejos, una micromatriz bien pergeñada podría establecer la causa exacta de la infección en un paciente cuyos síntomas, parecidos a los de un resfriado (dolor de cabeza, fiebre alta y dificultad para respirar), no denuncian un responsable claro. Podría componerse una superficie con ADN que represente genes que aparecen sólo en patógenos causantes de enfermedades similares; el laboratorio hospitalario podría extraer y marcar ADN de una muestra de tejido infectado (por ejemplo, de las fosas nasales del enfermo). La unión del ADN del paciente a alguna secuencia de un gen del la microplantilla nos descubriría al agente infeccioso responsable. De modo similar, las micromatrices que se están desarrollando podrían detectar si los bioterroristas han liberado cepas específicas de carbunco u otros gérmenes exóticos.

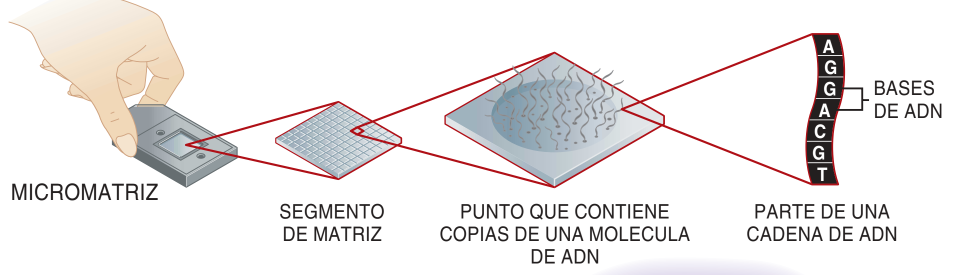
Para bien o para mal, las micromatrices de ADN podrían tam-

Resumen/Micromatrices

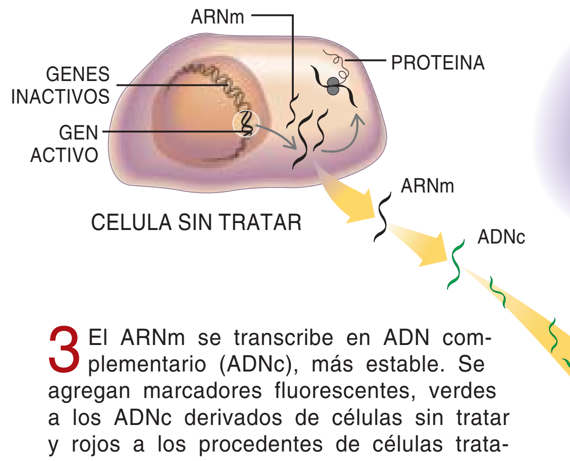
- Las *micromatrices*, o plantillas, de ADN pueden rastrear cientos de miles de reacciones moleculares en paralelo en una rejilla parecida a un portaobjetos de microscopio. Pueden diseñarse matrices para detectar genes específicos o para medir la actividad génica en muestras de tejido.
- Estas propiedades están resultando de un valor incalculable para los biólogos celulares, los oncólogos y los farmacólogos. Se está investigando también en la aplicación de las microplantillas para convertirlas en instrumentos seguros y rápidos de diagnóstico y prognosis.
- El estudio se extiende a las plantillas de proteínas, muy prometedoras, asimismo, en diagnóstico e investigación biológica.
- La información básica y diagnóstica proporcionada por las matrices de ADN y de proteína permitirá, andando el tiempo, instaurar terapias personalizadas.

ASI FUNCIONAN LAS MATRICES

Para determinar si un fármaco potencial supondrá un daño colateral del hígado, el investigador podría seguir los pasos descritos más abajo. La pregunta planteada sería de este tenor: ¿Provoca el fármaco en cuestión la activación de genes (determinantes de las proteínas) de las células hepáticas en un sentido lesivo para el hígado? Una respuesta afirmativa sería señal de problemas.



1 Se parte de una micromatriz que contenga ADN de cadena sencilla, representativo de miles de genes diferentes; cada uno se asigna a un punto diferente de la plantilla de 2,5 × 8 cm o menos. Cada punto alojará miles o millones de copias de la cadena de ADN.



2 Se toman dos muestras de células hepáticas. Se aplica el fármaco a una muestra. Luego, de cada muestra, se recuperan las moléculas de ARN mensajero, que representan las copias móviles de los genes y los moldes para la síntesis celular de proteínas.

3 El ARNm se transcribe en ADN complementario (ADNc), más estable. Se agregan marcadores fluorescentes, verdes a los ADNc derivados de células sin tratar y rojos a los procedentes de células tratadas.

4 Los ADNc marcados se aplican a la matriz. Cuando el ADNc de una muestra encuentra su secuencia de bases complementaria en la plantilla, se une a ella. Tal unión evidencia que el gen representado por el ADN de la plantilla se halla activo, vale decir, expresado en la muestra.

PAR DE BASES COMPLEMENTARIAS

ADNc DE CELULAS SIN TRATAR

MATRIZ DE ADN

ADNc DE CELULAS SIN TRATAR

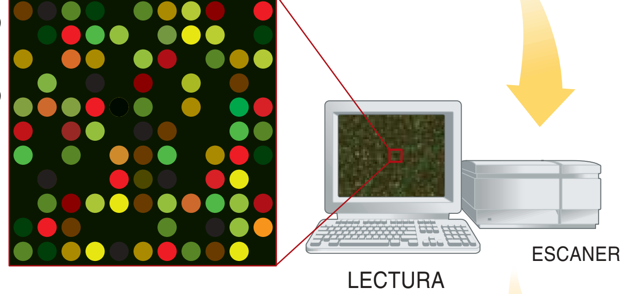
EJEMPLOS DE REACCIONES

GEN QUE HA INCREMENTADO NOTABLEMENTE SU ACTIVIDAD EN CELULAS TRATADAS

GEN QUE HA DISMINUIDO NOTABLEMENTE SU ACTIVIDAD EN CELULAS TRATADAS

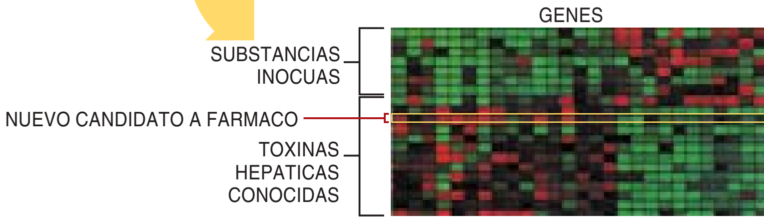
GEN QUE ESTABA IGUALMENTE ACTIVO EN CELULAS TRATADAS Y SIN TRATAR

GEN QUE ESTABA INACTIVO EN AMBOS GRUPOS



5 Se deposita la matriz o plantilla en el escáner. El ordenador calcula la relación de verde a rojo en cada punto (para cuantificar los cambios en la actividad genética inducidos por el fármaco) y genera una salida impresa en color.

PERFILES HIPOTETICOS DE ACTIVIDAD GENETICA EN CELULAS TRATADAS CON DIVERSOS COMPUESTOS



6 Se determina si ha habido genes que responden intensamente al fármaco en el sentido de promover o reflejar la lesión hepática. Puede también compararse el esquema general de expresión génica de los genes que han respondido de un modo intenso con los esquemas producidos cuando esos genes reaccionan a toxinas hepáticas conocidas (*derecha*). Una estrecha similaridad indicaría que nos hallamos ante un candidato tóxico. Cada cuadro del diagrama representa la respuesta de un gen a la sustancia.

bién determinar la predisposición genética de los individuos a numerosas enfermedades. La mayoría de las diferencias genéticas que se dan entre las personas revisten la forma de polimorfismos de un solo nucleótido, o SNP, en los que aparece cambiada una letra. Se podría construir una micromatriz con variantes de genes asociadas a enfermedades para detectar SNP individuales y predecir la probabilidad de que el sujeto en cuestión padezca Alzheimer, diabetes o un tipo de cáncer. Las personas proclives podrían someterse a un control estricto, recibir un tratamiento preventivo o pasar antes por el quirófano. Queda, empero, abierta la duda de hasta qué punto estas pruebas serán aceptadas por el público; ese conocimiento podría alimentar la ansiedad del interesado y facilitar su posible discriminación por aseguradoras o patronos.

De esos inconvenientes queda exenta otra información valiosa que proporcionan las micromatrices de SNP. Las variantes de genes influyen en la reacción del cuerpo a las medicinas que tomamos, lo que a su vez influye en la eficacia de los fármacos y en la intensidad de sus efectos secundarios. Las plantillas que pongan de relieve nuestras peculiares sensibilidades genéticas ayudarían a los clínicos a elegir las medicinas que convinieran más a cada paciente. Las micromatrices de SNP que revelan las mutaciones genéticas que incrementan la virulencia de los tumores permitirían que los anatomopatólogos determinaran la malignidad escondida de un tumor en apariencia benigno. Ambos tipos de microplantillas se están investigando ya con fines hospitalarios.

Expresión génica

No acaban ahí las apasionantes aplicaciones de la técnica. Desde otra óptica particular, ha atraído también el interés de los investigadores en los últimos años. Nos referimos al estudio de perfiles de expresión génica. Para obtenerlos, se mide la cantidad de diferentes ARNm en una muestra de tejido. En general, cuantas más copias de ARNm produce una célula, más copias de proteína sintetizará también. Por consiguiente, la cuantía de diversos ARNm apreciados en una muestra revelará, indirectamente, los tipos y cantidades de proteínas presentes. Compete a las proteínas controlar y llevar a cabo la mayoría de las funciones de nuestras células y tejidos. Se hallan en fase de desarrollo las micromatrices que miden directamente los niveles de proteína, aunque su construcción aparece rodeada de dificultades.

Con el uso del genoma como sensor para determinar cambios de actividad en genes de la célula, se obtendrán "instantáneas" detalladas del estado de alteración de las funciones celulares provocado por fármacos o enfermedades. A veces, resulta más útil conocer el esquema general de actividad de los genes en una muestra que saber qué genes concretos se activan en respuesta ante un estímulo. En esos casos, como veremos, el esquema sirve de "firma" taquigráfica que refleja el estado molecular de una muestra bajo unas condiciones particulares.

Los perfiles de expresión han demostrado su utilidad única en muchos frentes. Los biólogos celulares los usan porque, si sabemos qué proteínas predominan después de exponer un tejido a diferentes condiciones, podemos inferir el modo en que el tejido compensa las agresiones y qué es lo que deja de funcionar cuando se desarrolla una enfermedad.

Se recurre también a las plantillas de expresión génica para descubrir las funciones de genes identificados a través de la secuenciación del ADN nuclear. Hay otras técnicas que no utilizan micromatrices para mostrar las funciones de esos genes recientemente descubiertos (o, dicho con exactitud mayor, de las proteínas por ellos cifradas), pero tales métodos no siempre operan bien o con la presteza requerida. Las micromatrices de expresión génica pueden subsanar tales lagunas mediante la aplicación que se ha venido a llamar "culpable por asociación", incluso sin ninguna pista previa sobre el papel de los genes en el organismo.

El método en cuestión se funda en el hallazgo de la interrelación génica. Los genes no son islas. Si los de un tejido se activan e inactivan juntos en respuesta a un estímulo —un fármaco, una infección o una mutación inducida—, nos es dado suponer que esos genes que operan a coro intervienen en la misma vía reguladora; es decir, los genes trabajan juntos o en serie para inducir una respuesta celular. Resulta, pues, razonable pensar que las funciones de un gen del grupo, en principio desconocidas, se parecen a las de los otros genes cuya responsabilidad se ha resuelto ya.

Aplicación en farmacología

Los investigadores en el dominio de los fármacos se benefician también de las ventajas de ese método "culpable por asociación", cuando buscan proteínas cuya participación en procesos biológicos implicados en enfermedades se desconocía de antemano. Una vez descubiertas esas proteínas, pueden engrosar la lista de blancos para desarrollar nuevas y mejores medicinas.

Peter S. Linsley, colaborador nuestro en Rosetta Inpharmatics, se propuso identificar nuevos blancos para fármacos contra enfermedades inflamatorias, en las que el sistema inmunitario pervierte su misión y lesiona partes del cuerpo. Investigó, por tanto, qué genes de los leucocitos del sistema inmunitario aumentaban y disminuían su producción de proteínas en paralelo con el gen de la interleucina-2 (IL-2), una proteína involucrada en los procesos inflamatorios.

Obtuvo la respuesta tras conseguir perfiles de expresión génica de leucocitos expuestos a diversas sustancias químicas y ejecutar después un complejo programa de ajuste de pautas para detectar un conjunto de genes que se activaban o desactivaban al tiempo que se activaba el gen IL-2. En ese conjunto de genes había uno cuya función no se había determinado todavía por otros medios. Más o menos al mismo tiempo, otros investigadores del Instituto Pasteur de París confirmaron, por su lado, con un método diferente, que este gen intervenía en el metabolismo del IL-2. Los hallazgos combina-

PREDICCION DEL DESARROLLO DEL CANCER

De acuerdo con las investigaciones realizadas en Rosetta Inpharmatics y el Instituto Oncológico de Amsterdam, las micromatrices habrán de ayudarnos a distinguir entre pacientes de cáncer con diferente prognosis. Se determinaron los niveles de actividad (expresión) de los genes en tumores de mama pequeños y localizados en mujeres jóvenes, controladas durante los cinco años subsiguientes a su extirpación quirúrgica. Luego, se descubrió que las afectadas presentaban diferentes perfiles de expresión, como se llaman los patrones generales de actividad en una selección de genes tumorales. El análisis matemático reveló que las pacientes cuyos perfiles de expresión génica se parecían al perfil de "mala prognosis" (el esquema medio de tumores que generaban metástasis) tenían más probabilidades de sufrir una rápida recidiva que las pacientes cuyos perfiles se parecían a la signatura de "buena prognosis" (el modelo típico de tumores que no se propagaron). Si estos resultados se confirman en otras investigaciones, los médicos podrán algún día detectar a los pacientes que necesitan el tratamiento más agresivo, basándose en la similaridad entre sus perfiles de expresión y un perfil de buena o mala prognosis normalizado.

PERFILES DE EXPRESION

Pacientes individuales (agrupadas por similaridad de perfiles de expresión general)

FRACCION DE PACIENTES CON METASTASIS

0/20 (0%)

6/21 (29%)

18/24 (75%)

10/13 (77%)

Niveles de actividad de genes individuales (con respecto a los niveles de tejido mamario normal)

GEN QUE MUESTRA INCREMENTO DE ACTIVIDAD

GEN QUE MUESTRA DISMINUCION DE ACTIVIDAD

EL SINO DE LAS PACIENTES

Porcentaje libre de metástasis

100, 80, 60, 40, 20, 0

Mujeres con un perfil de expresión de "buena prognosis"

Mujeres con un perfil de expresión de "mala prognosis"

0, 50, 100, 150, 200

Tiempo (meses)

dos sugieren que la proteína codificada por el gen en cuestión podría convertirse en óptimo blanco para los antiinflamatorios.

En los departamentos de investigación de los laboratorios farmacéuticos se utilizan los perfiles de expresión génica de una manera distinta: para detectar (y eliminar) fármacos que ejercerían efectos secundarios inaceptables. Quienes estudian si un determinado compuesto podría dañar el corazón pueden compilar un compendio de perfiles de expresión génica para células cardíacas expuestas a fármacos ya existentes o a sustancias químicas. Si tratan células cardíacas con el fármaco ensayado, pueden esperar que el ordenador compare la firma resultante con el compendio de perfiles. Una firma que se corresponda con la producida por sustancias que se sabe que dañan a las células cardíacas haría saltar la alarma.

Un compendio de perfiles de expresión génica puede también ayudar a explicar por qué un fármaco produce determinados efectos secundarios. Apremia hoy saber por qué los inhibidores de la proteasa, que están salvando la vida de los infectados con el VIH (el virus del sida), pueden producir altos niveles de colesterol y triglicéridos en sangre, provocar extrañas distribuciones de la grasa corporal e inducir resistencia a la insulina. Conscientes de que el hígado influye en la síntesis y degradación de los lípidos (el grupo que incluye el colesterol y los triglicéridos) y las lipoproteínas, nuestro grupo de Rosetta, en colaboración con Roger G. Ulrich y su equipo en Abbott Laboratories, decidimos comprobar si un inhibidor de la proteasa —ritonavir— inducía algunos de estos efectos secundarios interesando al hígado.

Mediante una microplantilla que representaba unos 25.000 genes de rata obtuvimos perfiles de expresión génica de tejido hepático de rata expuesto a diversos compuestos con toxicidad potencial para el hígado. Agrupamos luego los compuestos en razón de la similaridad de sus firmas de expresión sobre unos 2400 genes que respondían intensamente a estas substancias. A continuación, administramos ritonavir a hígados de rata y comparamos los perfiles de expresión génica resultantes con los que habíamos conseguido antes.

Descubrimos que el ritonavir activaba genes que normalmente permanecían silentes en respuesta a un agente, bien conocido, que rebaja los niveles de lípidos. El ritonavir frena también la síntesis de proteínas que acostumbran ensamblarse en proteosomas, unas estructuras que degradan proteínas

Matrices de proteínas: Una nueva opción

N. Leigh Anderson y Gunars Valkirs

Las plantillas de proteínas se asemejan a las de ADN, con la salvedad de que portan polipéptidos en vez de moléculas nucleotídicas en su superficie; pueden medir los niveles de proteínas en los tejidos. De hecho, realizan el trabajo de un modo más directo y, según algunos resultados, con mayor precisión. Las micromatrices de proteínas presentan una característica exclusiva: su capacidad de revelar cuáles, de entre las miles de proteínas de un tejido, interaccionan entre sí.

Esa gavilla de propiedades que rodean a las plantillas de proteínas las hacen muy atractivas para los biólogos. Y de interés general resulta la posibilidad de que estos dispositivos aumenten espectacularmente el número de enfermedades que los médicos podrán diagnosticar sin demora en sus consultas.

Su utilidad diagnóstica reside en parte en que estas microplantillas, a diferencia de las de ADN, pueden extraer información del plasma sanguíneo, muy fácil de obtener. La mayoría de las enfermedades, desde las infecciosas hasta las complicaciones cardíacas o renales, dejan huellas identificables en la sangre, en forma de proteínas segregadas o perdidas. Más aún, en una sola prueba, las matrices podrían medir muchas, si no todas las proteínas indicadoras de problemas médicos. Considérese, por comparación, que las pruebas diagnósticas habituales sólo pueden detectar una o unas pocas proteínas específicas de enfermedades.

El diseño de plantillas de proteínas se parece al de las de ADN. Cientos o miles de diferentes proteínas se disponen (en millones de copias) en puntos específicos de una rejilla sobre una placa del grosor de una galleta. La unión de proteínas de una muestra de sangre a una plantilla revela la naturaleza y la cantidad de proteínas de la muestra.

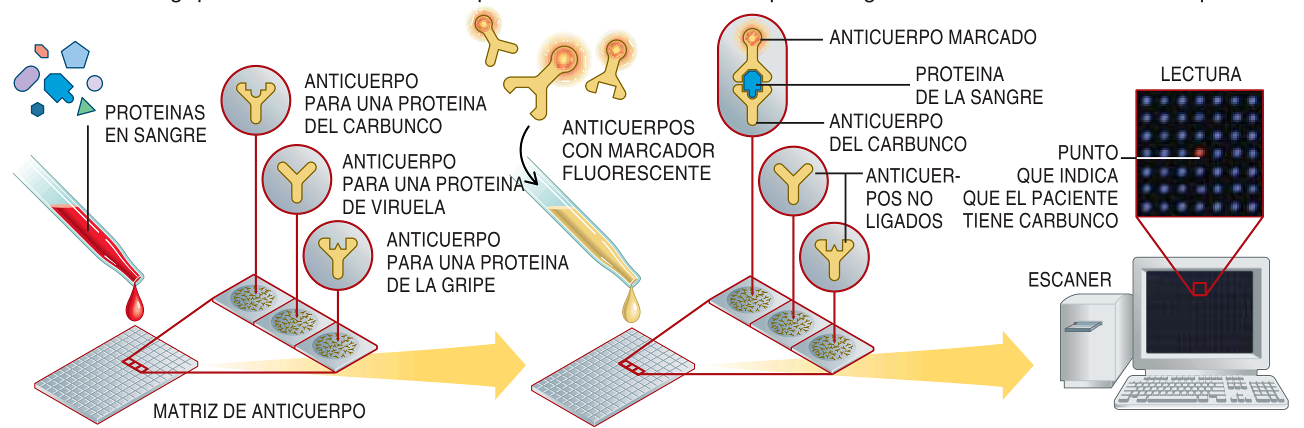
Los tipos de proteínas que pueden disponerse sobre la matriz o plantilla dependen de las cuestiones que se quiera abordar. Pero las matrices cuyo desarrollo se halla casi listo para la comercialización (al principio para uso de investigadores) se basan en los anticuerpos; cada una de estas moléculas del sistema inmunitario reconoce una proteína y se une a ella o, más exactamente, a un segmento determinado de la misma. Algunas de estas plantillas de anticuerpos funcionan por el método del emparedado: las proteínas reconocidas por una matriz quedan atrapadas entre dos anticuerpos diferentes, uno que sujeta la proteína y otro que hinca un marcador fluorescente en la molécula cautiva.

Para que las matrices de anticuerpo desarrollen todo su potencial en el dominio de la investigación y del diagnóstico, habrá que vencer al menos dos graves inconvenientes. Uno es la necesidad de técnicas que produzcan en masa anticuerpos muy diferentes a la vez, no sólo unos cuantos (los necesarios para unirse a un blanco, y, de ese modo, revelar incluso pequeñas cantidades en una muestra). Este problema se halla en vías de solución. El segundo obstáculo es más fundamental. La ciencia médica hasta ahora sólo ha descubierto unas docenas de los miles de proteínas capaces de señalar la presencia o el progreso de una enfermedad. Hasta que los fabricantes de matrices sepan qué proteínas tienen que identificar, sólo podrán buscar un número limitado de marcadores de enfermedades en una muestra de tejido. Se ha multiplicado la búsqueda de nuevas proteínas específicas de enfermedades. Cuando converjan los avances en manufactura de anticuerpos y el descubrimiento de proteínas, estaremos ante una segunda generación de matrices de proteínas que bien podrían transformar la investigación médica y la práctica clínica.

N. Leigh Anderson y Gunars Valkirs colaboran en la investigación de matrices de proteínas.

UNA PLANTILLA DE PROTEINA EN ACCION

Los médicos podrían recurrir a la "prueba del emparedado" para identificar el agente infeccioso responsable de la enfermedad de un paciente. ¿Es un virus normal de la gripe o se trata de una cepa nueva letal? ¿Podría ser el culpable el bacilo de la tuberculosis, el carbunco, la viruela o los microorganismos de la fiebre Q diseminados por bioterroristas? A través de los pasos siguientes se nos ofrece la respuesta.



1 Se aplica la muestra de sangre extraída de un paciente a una plantilla o matriz, que consta de anticuerpos asignados a cuadrados específicos de una rejilla. Cada cuadrado incluye múltiples copias de un anticuerpo capaz de unirse a una proteína específica procedente de un solo organismo; representa, pues, un agente infeccioso concreto.

2 Se aplican anticuerpos marcados con fluorescencia capaces de unirse a un segundo lugar de las proteínas reconocibles por los anticuerpos de la matriz. Si una proteína de la sangre se ha unido a la matriz o plantilla, uno de los anticuerpos fluorescentes se unirá a esa proteína, englobándola en un emparedado de anticuerpos.

3 Se introduce la matriz en un escáner para determinar qué microorganismo está presente en el cuerpo del paciente. En este caso, se muestra que el culpable es una cepa de carbunco.

Los autores

STEPHEN H. FRIEND y ROLAND B. STOUGHTON desempeñan labores directivas en Rosetta Inpharmatics, empresa fundada en 1996 para desarrollar métodos moleculares de perfiles génicos mediante ordenadores y técnica de micromatrices. Friend, biólogo molecular de formación, trabajó en el campo de la farmacología en el Centro Fred Hutchinson de Investigaciones Oncológicas. Stoughton, físico experto en informática, se ocupó un tiempo en el desarrollo de herramientas de procesamiento de señales y reconocimiento de patrones para su aplicación en geofísica y astrofísica.

que han perdido su utilidad, entre ellas las lipoproteínas. De tales descubrimientos se desprendía que el ritonavir incrementaba los niveles de lípidos en el hígado —y por consiguiente en sangre— en parte elevando la síntesis hepática de lípidos e inhibiendo la degradación de lipoproteínas. Una investigación más detenida de la interacción entre el ritonavir y las vías metabólicas de lipoproteínas y de proteosomas habrá de proporcionarnos claves para reducir sus efectos secundarios.

Ajuste de tratamientos

Disponer de un arsenal de fármacos con menos efectos secundarios constituirá un fruto valioso de los perfiles moleculares obtenidos con las plantillas de ADN. Pero muchos médicos confían en resultados incluso mejores: sueñan con herramientas rápidas de diagnóstico que dividirían a los pacientes con síntomas similares en grupos distintos; cada grupo recibiría un tratamiento diferente y apropiado. Igual que quedó demostrado en el caso del linfoma, al que nos referíamos al principio de este artículo, los oncólogos necesitan imperiosamente un procedimiento para identificar a los pacientes que requieran, desde el principio, un tratamiento radical.

La investigación de nuestro grupo de Rosetta, junto con el Instituto Oncológico de Amsterdam, sobre el cáncer de mama pone de relieve la forma en que podemos servirnos de las matrices de expresión génica. En este caso, buscábamos una prueba para determinar qué jóvenes pacientes con cáncer precoz de mama (sin metástasis en los ganglios linfáticos) necesitaban, y cuáles no, un tratamiento sistémico con quimioterapia para evitar la extensión del tumor después de la cirugía. Aunque las normas en uso recomiendan un tratamiento sistémico para el 90 % de estas mujeres, muchas de ellas probablemente evitarían metástasis incluso sin ese tratamiento. Desgraciadamente, los métodos estándar no detectan a las mujeres con mayor riesgo.

Empezamos por generar perfiles de expresión génica para tumores en cerca de 100 mujeres de menos de 55 años de edad cuyo curso clínico posquirúrgico se había seguido durante más de cinco años. Al principio trabajamos con una micromatriz que representaba 25.000 genes humanos. Descubrimos, por fin, que cierta firma producida por unos 70 genes indicaba claramente que no tardarían en aparecer metástasis. Además, la pauta opuesta revelaba un pronóstico esperanzador. Resulta evidente que algunos tumores están programados para producir metástasis antes de alcanzar el tamaño de un guisante, mientras que otras masas mayores no están programadas para propagarse.

Nuestros resultados tendrán que ser confirmados por otros antes de que los perfiles de expresión génica se conviertan en una rutina en el tratamiento del cáncer de mama. De aquí a dos años, es probable que muchos hospitales empiecen a ensayar los perfiles de expresión génica en su orientación diagnóstica, no sólo para el cáncer de mama, sino también para otros tipos. Hay enfermedades que necesitan mejores herramientas de diagnóstico. Los perfiles de expresión génica podrían ayudar a distinguir subgrupos de pacientes asmáticos, diabéticos u obesos que demandan una terapia específica. Hablamos de aplicaciones en las que se está trabajando ya.

Antes de que las micromatrices desarrollen todo su potencial en investigación y diagnóstico, deberemos allanar algunos obstáculos. Las plantillas, los escáneres y otros accesorios siguen siendo caros. Podemos suponer que los costes bajarán con el tiempo.

Ahora bien, aunque bajen los precios, las técnicas pueden ser inaplicables, cuando menos al principio, para las consultas de los médicos o los laboratorios normales. Escasean los médicos y los técnicos que posean los conocimientos o el instrumental para preparar correctamente las muestras de tejido a utilizar con matrices. Lo que es más, para diagnosticar, pongamos por caso, una enfermedad del hígado por los cambios de expresión génica en células hepáticas, un médico tendría que obtener tejido de ese órgano. Y éste no es fácilmente accesible.

Tales problemas, hoy graves, se resolverán con un grano de ingenio. A veces, los tejidos más accesibles pueden funcionar como aceptables sustitutos de los inaccesibles. Además, en algunos casos, no tendrán que usarse las micromatrices; podrían aportar la información necesaria para idear nuevas pruebas diagnósticas, que pueden revestir otras formas.

Conforme mejore nuestra comprensión de las células y del organismo entero, los médicos podrán diagnosticar con mayor precisión, indicar terapias más depuradas (incluidas probablemente las genéticas) y ajustar sus tratamientos a las características genéticas y al estado fisiológico real de cada paciente. Hacia el año 2020, las organizaciones sanitarias podrían conservar, en sus ordenadores, modelos del estado molecular de sus afiliados, simulaciones virtuales que podrían actualizarse constantemente con datos de micromatrices u otros a partir de sus visitas al médico y con nueva información científica sobre biología celular.

Bibliografía complementaria

GENOMICS, GENE EXPRESSION AND DNA ARRAYS. David Lockhart y Elizabeth Winzeler en *Nature*, vol. 405, págs. 827-836; 15 de junio, 2000.

EXPERIMENTAL ANNOTATION OF THE HUMAN GENOME USING MICROARRAY TECHNOLOGY. D. D. Shoemaker et al. en *Nature*, vol. 409, págs. 922-927; 15 de febrero, 2001.



Los anillos de los planetas

Joseph A. Burns, Douglas P. Hamilton y Mark R. Showalter

¡Cuánto se empobrecería el universo si Saturno y los demás planetas gigantes no tuvieran anillos! Por fin se va sabiendo cómo los esculpe la gravedad



1. LAS PEQUEÑAS LUNAS (*puntos*) cercanas a los anillos de Saturno son la causa de muchas de las particularidades del sistema. El Sol brilla a través de la división de Cassini —un gran espacio vacío entre los anillos que se puede ver desde la Tierra con telescopios de aficionado— y su luz se refleja en los débiles anillos exteriores.

Gran parte de la economía mundial se basa en los inventos que hizo posible el físico del siglo XIX James Clerk Maxwell, padre del electromagnetismo y pionero de la termodinámica. Poco beneficio económico, en cambio, han aportado los anillos de Saturno, otro de sus temas de investigación favoritos. No por eso han de dejado de cautivar. Decía en el trabajo con el que ganó el premio Adams de 1857:

> Hay algunos problemas en astronomía hacia los que nos sentimos atraídos... por su peculiaridad... [más] que por las ventajas directas que su solución pudiera aportar a la humanidad... Que yo sepa, no ha habido ningún uso práctico de los anillos de Saturno... pero cuando los contemplamos desde un punto de vista meramente científico se convierten en los cuerpos más notables del cielo, exceptuando, quizás, esos otros cuerpos aún más "inútiles", las [galaxias] espirales... Pero en cuanto de verdad hemos visto ese arco enorme doblarse sobre el ecuador del planeta sin que se perciba conexión alguna, no podemos apaciguar ya la mente.

Siglo y medio más tarde los anillos de Saturno siguen siendo un símbolo de todo lo exótico y maravilloso que hay en el universo. Mejores observaciones no han sino multiplicado su belleza. Hasta tal punto han cambiado los descubrimientos de los últimos veinte años nuestro conocimiento de ellos, que se puede decir que nos han revelado un sistema de anillos nuevo, mucho más complejo e interesante, además, de lo que la teoría, las observaciones o la imaginación nos habían hecho esperar.

También los demás planetas gigantes tienen sistemas anulares, y no hay dos que se parezcan. Los anillos son raros hasta para la vara de medir de la astronomía. Los forman procesos que en ocasiones son débiles y contrarios a la intuición (por ejemplo, en los anillos la gravedad a veces repele). Antes pensábamos que eran estáticos; hoy sabemos que están en continua evolución. Hemos observado su simbiosis vital con las lunas. Y ya no nos parecen sólo un fenómeno exquisito: como Maxwell, los científicos actuales les ven similitudes con las galaxias, y puede además que gracias a ellos barrunten los fundamentos del origen del sistema solar.

Los anillos de Saturno, descubiertos por Galileo Galilei en 1610 e interpretados como tales anillos cinco décadas más tarde por Christiaan Huygens, estuvieron solos durante tres siglos y medio. Entonces, en un intervalo de apenas siete años, se descubrieron anillos alrededor de los otros tres planetas gigantes. Primero les tocó a los de Urano, en 1977. James L. Elliot, entonces en la Universidad de Cornell, observó la variación del brillo de una estrella a medida que Urano pasaba por delante y vio que la estrella aparecía y desaparecía; dedujo que una serie de bandas estrechas un poco elípticas o inclinadas rodeaban al planeta [*véase* "Los anillos de Urano", por Jeffrey N. Cuzzi y Larry W. Esposito; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, septiembre de 1987]. En 1979 la nave espacial Voyager 1 vislumbró los diáfanos anillos de Júpiter. Por último, en 1984, con un método similar al de Elliot, se detectaron trozos de anillos —pero no anillos completos— alrededor de Neptuno.

Aquellos días de gloria pasaron. La investigación de los anillos quedó estancada hasta mediados del decenio de 1990. Empezó entonces una nueva era en su exploración con una lluvia de observaciones del telescopio espacial Hubble, de los telescopios instalados en el suelo y de la sonda Galileo, en órbita alrededor de Júpiter [*véase* "La cosecha de la misión Galileo", por Torrence V. Johnson; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, abril de 2000]. Los anillos y satélites más débiles de Saturno se hicieron visibles en 1995 y 1996 cuando, debido a las posiciones relativas de la Tierra y Saturno, el sistema anular se nos mostró de canto y se redujo el brillo de los anillos principales. En julio de 2004 el satélite artificial Cassini empezará su gira de cuatro años por el sistema saturniano.

Los cuatro sistemas de anillos

Aunque los cuatro sistemas anulares conocidos difieren en el detalle, comparten un gran número de propiedades generales. Son ricos en textura y constan de múltiples anillos concéntricos, con frecuencia separados por espacios de anchuras varias. Cada anillo se compone de innumerables partículas —trozos de roca y hielo— que se mueven de forma independiente alrededor del planeta central, a la vez que se van topando sin violencia unas con otras. Los anillos se pueden clasificar en dos grandes categorías según la densidad de su población de partículas, descrita por el espesor óptico, o caída exponencial de la luz cuando penetra perpendicularmente en el anillo. En los más densos, los de Urano (designados con números y letras griegas) y los principales de Saturno (el A y el B), el espesor óptico llega a ser de 4; quiere decir que apenas un 2 por ciento de la luz puede atravesarlos. El diámetro de sus partículas va de unos pocos centímetros a varios metros.

Las partículas de los sistemas de anillos densos chocan con frecuencia, incluso hasta varias veces en una sola vuelta alrededor del planeta. Así se pierde energía y se redistribuye el momento angular. Puesto que las partículas más cercanas al planeta se mueven más deprisa que las más alejadas, los choques frenan aquéllas (y las acercan al planeta) e impulsan éstas (y las alejan del planeta). En consecuencia, los anillos tienden a expandirse radialmente. Pero esta expansión requiere su tiempo; se puede considerar al anillo, en lo que a esto respecta, un fluido viscoso que se difunde despacio hacia dentro y hacia fuera. Los anillos de Saturno tienen una viscosidad cinemática efectiva similar a la del aire.

La pérdida de energía, combinada con la redistribución del momento angular, es la causa de que los sistemas de anillos densos se aplanen. Sin importar la forma original, el sistema evoluciona enseguida hacia un disco delgado y casi ecuatorial. Los anillos de Saturno tienen cientos de kilómetros de ancho, pero entre su cara superior y la inferior sólo hay unas decenas de metros; en comparación, su grosor viene a ser el de una hoja de papel de seda que cubriera un campo de fútbol. Unos procesos similares aplanan también los discos gaseosos de las galaxias espirales y los de residuos que rodean a las estrellas.

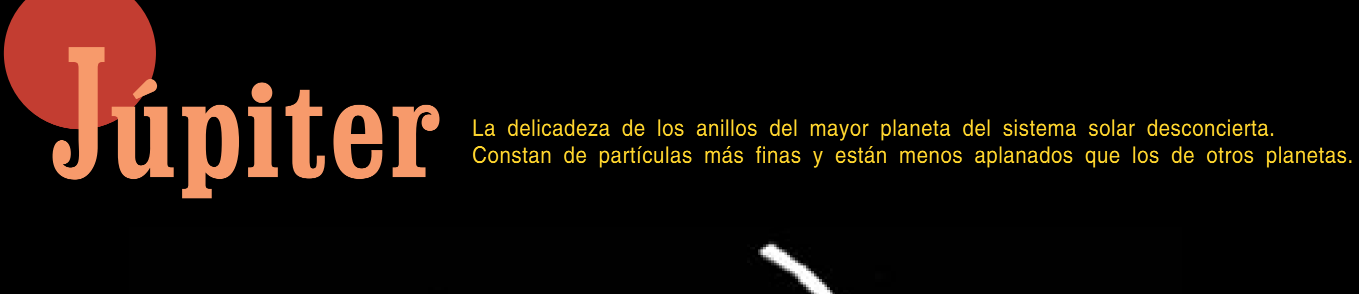
Otra consecuencia de una alta concentración es que se refuerza la atracción gravitatoria mutua entre las partículas. Ahí podría residir la causa de que los anillos de Urano hayan perdido un poco su circularidad: su propia gravedad les hace resistir la tendencia a formar una banda circular.

En el otro extremo, los anillos más tenues que se conocen, los de Júpiter o los más exteriores de Saturno, tienen espesores ópticos entre 10^{-8} y 10^{-6}. Las partículas están tan separadas como los laterales de un equipo de fútbol. Puesto que rara vez chocan, no tienden a permanecer en un disco plano. Por la manera en que estos anillos dispersan la luz sabemos que sus partículas son un polvo fino, con un diámetro de unas micras de diámetro, tamaño comparable al de las partículas de humo. Estas estructuras son, pues, al pie de la letra, anillos de humo. Tales partículas presentan una dinámica poco habitual; al ser tan pequeñas, no sólo influyen en ellas las fuerzas de la gravedad, sino también las electromagnéticas y de la radiación.

Los anillos de Neptuno no se ajustan a ninguna de estas dos definiciones; sus espesores ópticos están entre los dos extremos. El sistema neptuniano es también anómalo en otros sentidos. El anillo más denso no forma una banda continua; consta de unos

Los autores

JOSEPH A. BURNS, DOUGLAS P. HAMILTON y MARK R. SHOWALTER comenzaron a trabajar en equipo en la Universidad de Cornell, donde enseña Burns, cuando Hamilton y Showalter eran aún estudiantes de doctorado. Burns se tituló en ingeniería naval, pero ahora ocupa allí la cátedra I. P. Church de ingeniería y astronomía. Hamilton, hoy profesor de la Universidad de Maryland, obtuvo en 1999 el premio Urey de la Sociedad Norteamericana de Astronomía por sus estudios sobre la mecánica celeste del polvo. Showalter investiga en la Universidad de Stanford, donde dirige el archivo de datos sobre los anillos planetarios de la NASA. Es grande la participación de los tres en las misiones espaciales a los planetas exteriores.



Júpiter

La delicadeza de los anillos del mayor planeta del sistema solar desconcierta. Constan de partículas más finas y están menos aplanados que los de otros planetas.



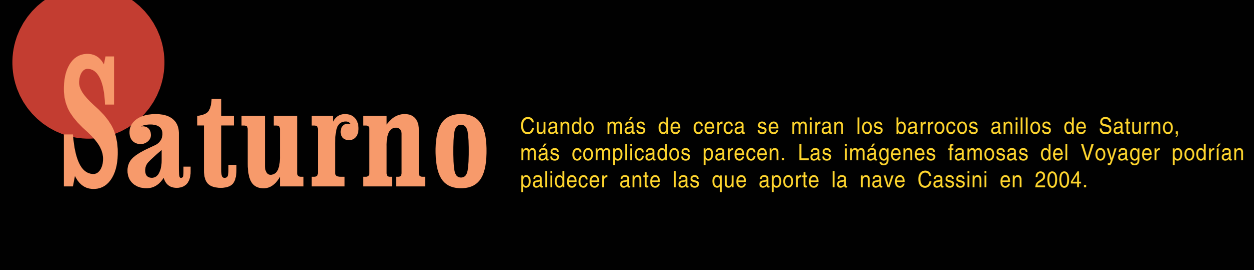
En este mosaico de imágenes tomadas por la nave Galileo se ve a Júpiter eclipsado. Resaltan la alta atmósfera y los anillos.

Un halo tenue y bulboso se levanta desde el borde interior del anillo principal.

HALO
ANILLO PRINCIPAL

Unos anillos sutiles, poco perceptibles (*bandas amarillas, rojas y azules*), se extienden más allá del anillo principal y del halo (*abultamiento en blanco y negro de la izquierda*).

HALO
ANILLO PRINCIPAL
ANILLOS SUTILES
METIS
ADRASTEA
AMALTEA
TEBE



Saturno

Cuando más de cerca se miran los barrocos anillos de Saturno, más complicados parecen. Las imágenes famosas del Voyager podrían palidecer ante las que aporte la nave Cassini en 2004.

UN ANILLO (representación artística)

Hay al menos un sitio donde los satélites van retirando bolas de nieve de un metro de diámetro.

ANILLO B

Las “radios” son manchas causadas por granos de polvo en suspensión. Los innumerables subanillos están aún por explicar.

EL HUECO DE ENCKE

Abierto por el pequeño satélite Pan.

ANILLO C

Esta imagen exagera las leves diferencias de color entre el anillo C (*azul*) y el B (*color oro*).

ANILLO F

Las múltiples hebras están anudadas por la atracción de dos satélites cercanos.

E
G
F
A
B
C
D

EPIMETEO
JANO
PANDORA
PAN
ATLAS
PROMETEO
HUECO DE ENCKE
DIVISION DE CASSINI
MIMAS

arcos discontinuos que suman menos de una décima parte de círculo. Sin algún mecanismo de confinamiento, estas estructuras deberían extenderse por completo alrededor del planeta en apenas un año. Sin embargo, las imágenes del Hubble y de los observatorios de tierra muestran que las posiciones de los arcos apenas se han desplazado en el transcurso de 15 años.

Lunas y anillos: las resonancias

Todos los sistemas de anillos densos están próximos al planeta; nunca sobrepasan el límite de Roche, el radio en cuyo interior las fuerzas de marea del planeta son mayores que la tendencia de las partículas del anillo a concentrarse en cuerpos mayores. Fuera de ese límite se halla una zona donde lunas pequeñas y de forma irregular coexisten con anillos tenues; las interacciones entre aquéllas y éstos son la causa de muchos de los aspectos más extraños de los sistemas anulares.

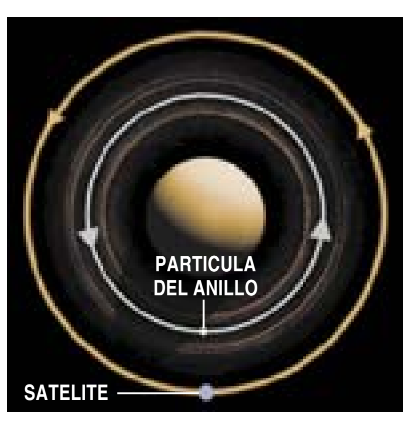
Por ejemplo, el anillo E de Saturno, que abarca la vasta región de los satélites Mimas, Encélado, Tetis, Dione y Rea, alcanza su brillo máximo precisamente en la órbita de uno de ellos, el liso y helado Encélado. El estrecho anillo F, que entrelaza diversas hebras, está encajonado, justo más allá del anillo A, entre dos lunas, Pandora y Prometeo. También en los sistemas de Júpiter, de Urano y de Neptuno hay una correlación entre las posiciones de los satélites y las características de los anillos. El mayor avance en la ciencia de los anillos de los últimos veinte años ha sido averiguar cómo ejercen los satélites tal fuerza. Parece que operan tres procesos básicos. El primero es la resonancia orbital, la tendencia de las fuerzas gravitatorias a magnificarse en ciertas posiciones en las que el período orbital de la partícula coincide con una razón entera ($m:n$, con m y n enteros) del período orbital del satélite. Las partículas del borde exterior del anillo B de Saturno están en una resonancia 2:1 con Mimas; significa que orbitan alrededor del planeta justo dos veces mientras ese satélite da sólo una vuelta. Otro ejemplo: el borde exterior del anillo A de Saturno se halla en resonancia 7:6 con los satélites Jano y Epimeteo.

Las órbitas que pasan cerca de los lugares de resonancia sufren grandes distorsiones: los suaves tirones de las lunas se repiten con regularidad y se acumulan con el tiempo. Las resonancias son más fuertes para las partículas que tienen órbitas cercanas a la de una luna, pero cuando las órbitas están muy próximas compiten por el control distintas resonancias y los movimientos se vuelven caóticos. Las resonancias son intensas cuando $m = n + 1$ (por ejemplo, 2:1 o 43:42); cuanto más difieren m y n, más se debilitan. En toda la inmensa extensión de los anillos de Saturno sólo unas pocas docenas de localizaciones responden a resonancias intensas con algún satélite.

De las perturbaciones causadas por las resonancias se derivan resultados diversos. Las resonancias más intensas eliminan material; así se explican los bordes externos de los anillos A y B de Saturno. En algunos lugares se abren huecos; una resonancia de ese estilo podría ser la causa del anillo discontinuo de Neptuno. Resonancias similares explican la distribución del material en el cinturón de asteroides, donde el Sol representa el papel del planeta y Júpiter el de satélite.

En otras partes del anillo A las resonancias originan ondulaciones. Si el satélite tiene una órbita elíptica, el resultado será una ondulación espiral, una versión en miniatura de la configuración de nuestra galaxia. Si tiene una órbita inclinada, habrá ondulaciones verticales que se proyectarán fuera del plano, unos pequeños pliegues en una alfombra cósmica.

Si bien las resonancias están ligadas de ordinario a los satélites, cualquier fuerza que se repita en una razón entera del período orbital —el campo gravitatorio del planeta en su conjunto o unas fuerzas electromagnéticas variables— ejercerá efectos similares. El sistema joviano se hace de notar por resonancias de este tipo. Más acá de un radio de 120.000 kilómetros el anillo se ensancha de repente; de un disco delgado pasa a ser un toro grueso. Una partícula del anillo situada a esa distancia gira alrededor del planeta tres veces por cada dos revoluciones planetarias; por eso el campo magnético inclinado del planeta empuja sin cesar la partícula hacia arriba. Aún más cerca del planeta, a una distancia de 100.000 kilómetros, el brillo del anillo disminuye de golpe; es el sitio de la resonancia electromagnética 2:1. Las partículas que derivan hasta





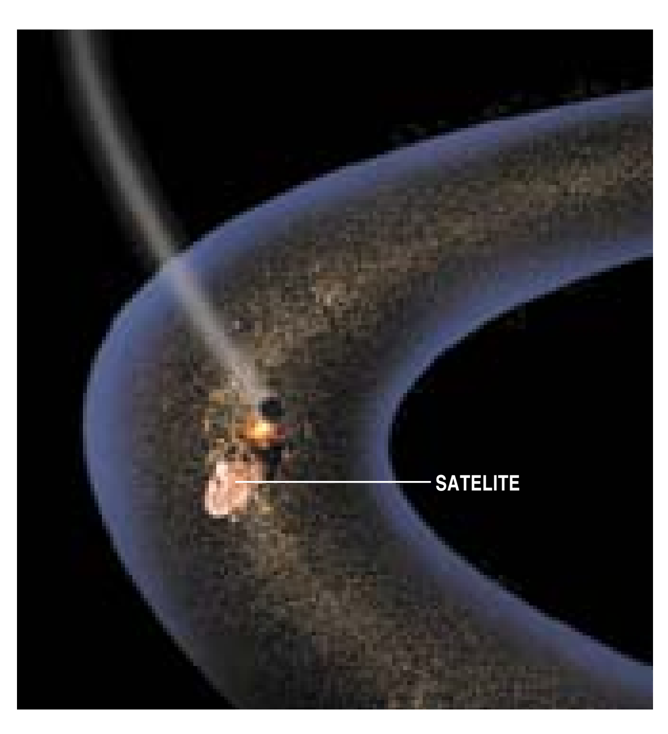


2. LA RESONANCIA entre un satélite y una partícula del anillo sincroniza las órbitas de uno y otra. En este caso la partícula gira alrededor del planeta dos veces en el tiempo que tarda el satélite en hacerlo una. Puesto que sus encuentros siempre se producen en el mismo punto, las atracciones gravitatorias se van sumando.

allá se enrarecen tanto, que se las pierde de vista contra el resplandor del planeta gigante.

Lunas y anillos: la gravedad repulsiva

Los satélites también conforman las estructuras de los anillos con su influjo en las trayectorias de las partículas. La interacción gravitatoria entre un satélite y una partícula cercana desafía en cierta forma a la intuición. Si los dos cuerpos estuvieran solos, su encuentro sería simétrico en el espacio y en el tiempo. La partícula se acercaría hacia el satélite, se aceleraría, lo rodearía, saldría disparada por el otro lado y se frenaría (siempre que no hubiese colisión). El camino de salida sería la imagen especular del camino de entrada (una hipérbola o una parábola). La partícula cambia de dirección, pero con el tiempo recupera su velocidad inicial.



3. CUANDO ALGO CHOCA contra un satélite, el material que se desprende se incorpora al anillo. A la inversa, el satélite se lleva consigo sin cesar parte del material anular. El balance entre estos efectos opuestos determina el tamaño de los anillos tenues.

En un sistema de anillos, sin embargo, el satélite y la partícula no están aislados, sino que orbitan alrededor de un tercer cuerpo, el planeta. El cuerpo más cercano al planeta girará más rápido. Supongamos que es la partícula. Cuando se aproxima mucho al satélite, la gravedad de éste la impulsa a una nueva órbita. Se trata de un proceso asimétrico: la partícula se acerca al satélite y la interacción gravitatoria de los dos cuerpos se intensifica, pero no recupera la partícula la velocidad que tenía antes porque su energía orbital y momento angular han disminuido. Se le ha distorsionado la órbita: el círculo se ha convertido en una elipse de un tamaño algo menor. Luego, las colisiones dentro del anillo restaurarán una órbita circular, aunque menor.

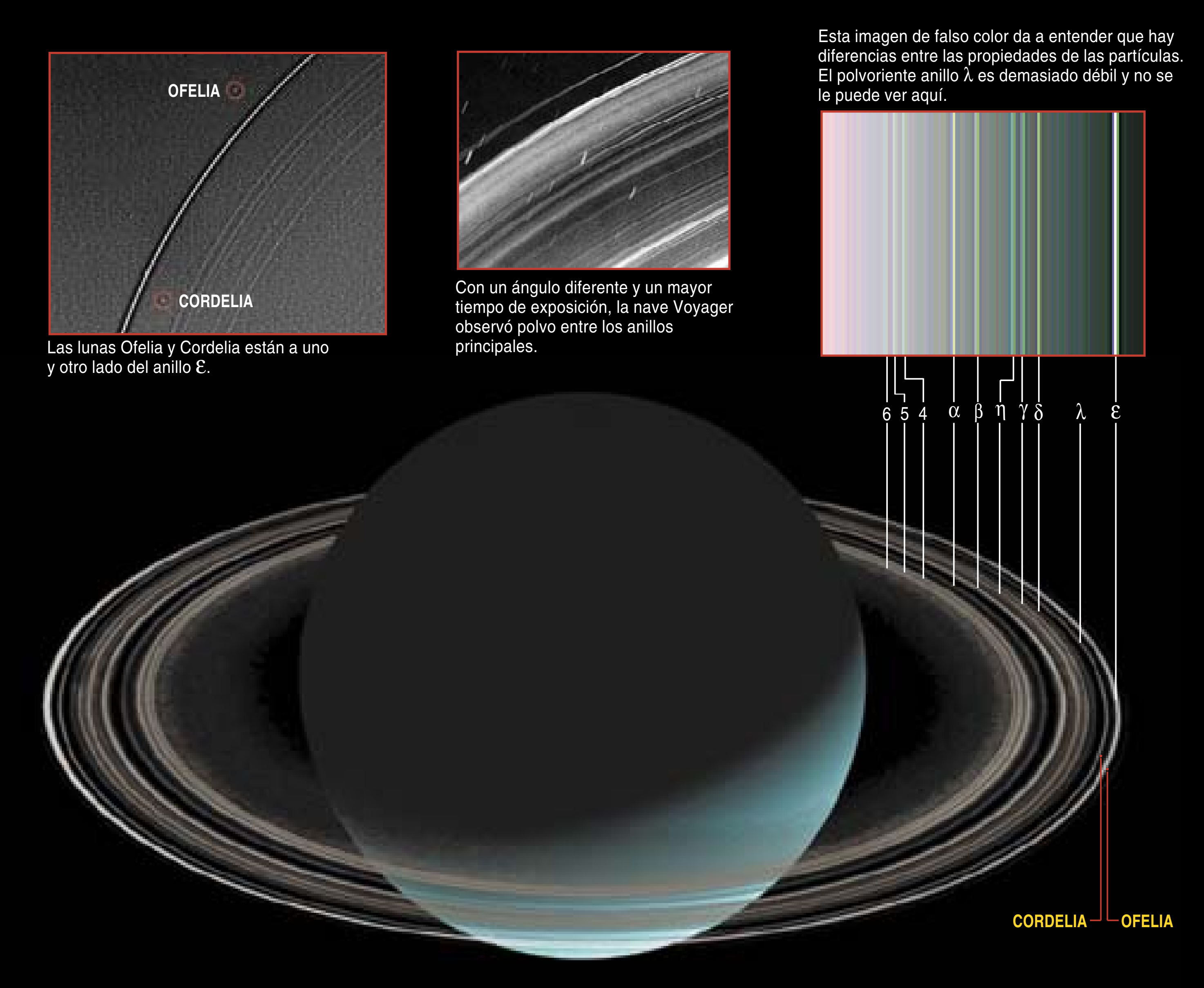
El efecto neto es que se empuja la partícula hacia dentro. Lo que pierde lo gana el satélite; ahora bien, como la masa de éste es mayor, se moverá menos, en la correspondiente proporción. Si se invierten las posiciones, los papeles se invertirán también: con el satélite en el interior, la partícula será empujada hacia fuera y el satélite hacia dentro. En ambos casos parecerá que la gravedad atractiva del satélite repele el material del anillo. No se ha violado ninguna ley de Newton; ese resultado tan extraño se produce siempre que dos cuerpos en órbita alrededor de un tercero interaccionan y pierden energía. (Este efecto no tiene nada que ver con la gravedad "repulsiva" que aparece en las teorías del universo en expansión.)

Al igual que las resonancias, este mecanismo puede abrir en los anillos unos huecos que crecerán hasta que las fuerzas repulsivas del satélite se compensen con la tendencia de los anillos a expandirse en las colisiones. Se ven huecos así en los anillos A, C y D de Saturno y a lo largo de la división de Cassini, la zona que separa los anillos A y B.

Al revés, el proceso puede comprimir un anillo estrecho. Dos satélites, uno a cada lado, pueden acorralar una banda de material y echar atrás a las partículas que intenten escapar. En 1978 Peter Goldreich y Scott D. Tremaine, entonces en el Instituto de Tecnología de California, expusieron la hipótesis según la cual la curiosa estabilidad de los anillos filiformes de Urano se debía al acorralamiento [*véase* "Anillos en el sistema solar", por James B. Pollack y Jeffrey N. Cuzzi; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, enero de 1982]. Los satélites Cordelia y Ofelia mantienen acorralado al anillo ε de Urano; el anillo F de Saturno parece estar encerrado entre Prometeo y Pandora. No cabe duda, sin embargo, de que la mayoría de los huecos visibles y de los anillos más angostos está aún por explicar. Quizá se deban a la acción de lunas muy pequeñas que la técnica de hoy no consigue ver. Es posible que la sonda Cassini descubra algunos de los cuerpos ocultos que mueven los hilos.

Otro efecto de la gravedad repulsiva son las ondulaciones de los bordes de los anillos. Se las entiende mejor desde la atalaya del satélite. Una corriente continua de partículas de los anillos pasa ante él; cuando llegan a su altura, la gravedad convierte sus órbitas circulares en elipses de casi el mismo tamaño, con lo que dejan de mantener una separación constante con el planeta. Desde el satélite daría la impresión de que las partículas empiezan a moverse hacia delante y hacia atrás de manera concertada. El movimiento aparente es sinusoidal, con una longitud de onda proporcional a la distancia entre las órbitas del satélite y de la partícula.

La ondulación resultante aparece detrás del satélite, si la partícula se halla en el exterior; por delante, si está en el interior. Viene a ser como la estela de un bote en un inusual río donde el agua se moviera en uno de sus costados más deprisa que la propia embarcación. Uno de nosotros (Showalter) estudió los



Las lunas Ofelia y Cordelia están a uno y otro lado del anillo ε.

Con un ángulo diferente y un mayor tiempo de exposición, la nave Voyager observó polvo entre los anillos principales.

Esta imagen de falso color da a entender que hay diferencias entre las propiedades de las partículas. El polvoriente anillo λ es demasiado débil y no se le puede ver aquí.

bordes ondulados de la división de Encke, en Saturno, y descubrió un satélite pequeño, Pan, que había pasado inadvertido a los observadores. Otro ejemplo es el anillo F, cuyos grumos periódicos parecen ser obra de Prometeo.

Los anillos sucios

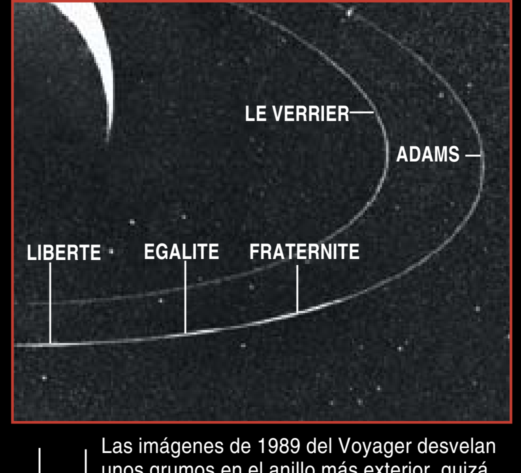
El tercer y último efecto ejercido por las lunas sobre los anillos es la expulsión y adquisición de material. Este papel, de especial importancia para los anillos débiles y polvorientos que rodean a Júpiter, se ha percibido con claridad sólo cuando la misión Galileo se acercó a éste. Con anterioridad, la nave Voyager había descubierto algunos anillos de Júpiter y dos nuevas lunas pequeñas, Adrastea y Metis, situadas cerca del borde exterior del anillo principal. Pero su cámara no tenía poder suficiente para captar qué hacían de verdad esos satélites. ¿Acorralaban a los anillos e impedían que se expandiesen hacia el exterior? ¿O eran la fuente del material de los anillos, el cual, una vez en órbita, derivaba hacia el interior? El Voyager tampoco pudo dar sentido a una débil extensión externa, un anillo sutil que acompañaba al anillo principal.

El sistema de toma de imágenes del Galileo encontró que ese anillo tan tenue se esfumaba de pronto allende la órbita de la luna Amaltea; descubrió tam-

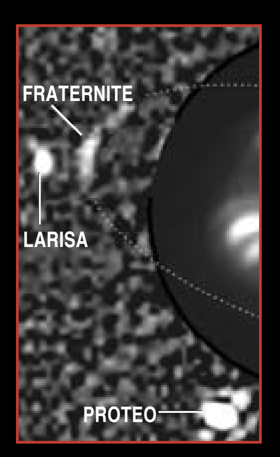
Neptuno

Los anillos menos conocidos y peor comprendidos son los de Neptuno. El más exterior tiene grumos (o "arcos"). Puede que se necesite la visita de otra nave espacial para analizarlos.

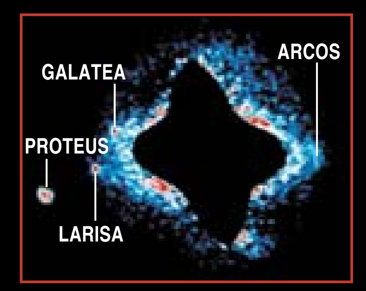
LOS ANILLOS LE VERRIER Y ADAMS



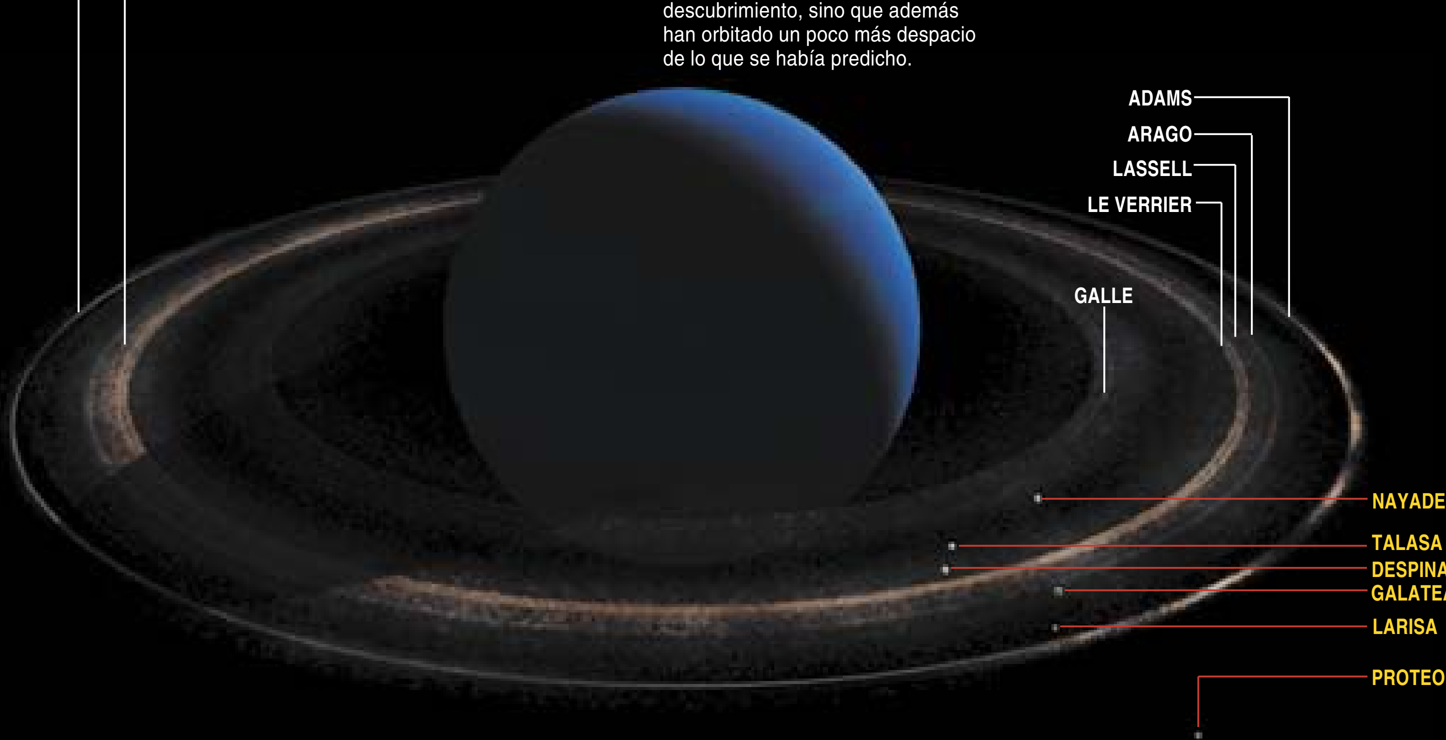
Las imágenes de 1989 del Voyager desvelan unos grumos en el anillo más exterior, quizá resultado de una complicada resonancia con un satélite.



Los arcos de anillo también aparecen en las imágenes que tomó el telescopio espacial Hubble en 1998. No sólo han persistido desde su descubrimiento, sino que además han orbitado un poco más despacio de lo que se había predicho.



Las observaciones tomadas desde tierra en 1998 coinciden con las conclusiones del Hubble.



bién otro aún más débil que llegaba hasta la luna Tebe, pero no más lejos. Ya en el vuelo de regreso tras ese encuentro con Júpiter, uno de nosotros (Burns) dio con la prueba del delito: la extensión vertical del más interior de esos anillos débiles era igual a la inclinación orbital de Amaltea y la del más externo coincidía por completo con la inclinación de Tebe. Es más, esos dos anillos brillan más en sus bordes superior e inferior; quiere decir que allí se apila material, conforme cabe esperar cuando las partículas y los satélites muestran una misma inclinación orbital. Esta estrecha asociación se explica de la manera más natural si las partículas son residuos expelidos por los impactos de los meteoritos contra los satélites.

Se da la paradoja de que las lunas pequeñas constituyen mejores fuentes de material que las grandes: son un blanco menor, pero al ser también menor su campo gravitatorio escapan de ellas más residuos. Se calcula que en el sistema joviano los donantes más eficaces tienen entre 10 y 20 kilómetros de diáme-

tro. Ese es justo el tamaño de Adrastea y Metis; de ahí que generen anillos más formidables que Amaltea y Tebe, pese al tamaño, mucho mayor, de éstas.

Una rara excepción la encontramos en Encélado, luna de Saturno. Tiene 500 kilómetros de diámetro y al parecer es la fuente del anillo E. En este caso puede que la razón de la fecundidad no resida en los choques de los proyectiles interplanetarios, sino en los fuertes impactos de las partículas del anillo. Cada grano que golpea en Encélado genera múltiples partículas de reemplazo; puede, pues, que el anillo E se regenere a sí mismo. En cualquier otro sitio esas colisiones suelen acabar en una absorción neta del material anular.

La juventud de los anillos

La evidente importancia de las fuentes y los sumideros reabre la pregunta clásica de si los anillos son estructuras viejas y permanentes o jóvenes y transitorias. Según la primera posibilidad se remontan al origen del sistema solar. El protosol estaba rodeado por la nube plana de gas y polvo de la que, según se piensa, nacieron los planetas. De manera semejante, cada planeta gigante tendría su propia nube engendradora de satélites. Muy cerca del planeta, dentro del límite de Roche, las fuerzas de marea habrían impedido que el material se agregase y creara satélites; a cambio, formó anillos.

O bien los anillos que observamos hoy aparecieron más tarde. Quizá se despedazó un cuerpo que pasó muy cerca del planeta, quizá se desintegró un satélite al chocar con un cometa rápido. Los fragmentos de un satélite desintegrado se habrían reagrupado sólo si se encontraban más allá del límite de Roche. Incluso entonces, no se habrían producido más que pequeños cúmulos sin consolidar, susceptibles de nuevas fragmentaciones.

Diversos tipos de indicios señalan ahora que la mayoría de los anillos son jóvenes. Primero, las vidas de los granos pequeños no pueden ser largas. Aun cuando sobrevivieran a los micrometeoritos interplanetarios y a la violencia del plasma magnetosférico, la pequeña fuerza de la radiación los precipitaría hacia el interior. A menos que se los alimente, los anillos débiles deberían desaparecer en apenas unos miles de años. Segundo, pese a que la reacción de las ondas espirales de densidad aparta deprisa a las lunas, algunas están todavía muy cerca de los anillos.

Tercero, las partículas de hielo de los anillos deberían estar oscurecidas por los residuos cometarios, y sin embargo, por lo general, brillan. Cuarto, los satélites que se hallan justo más allá de los anillos de Saturno tienen densidades bajas; parecen pilas de residuos. Por último, algunas lunas están sumergidas en los anillos. Si los anillos no son más que material primigenio que no logró agregarse, ¿cómo han llegado hasta ahí esas lunas? Se comprende mejor su presencia si no son otra cosa que los mayores fragmentos de un cuerpo descuartizado.

Por tanto, da la impresión de que los anillos no son las estructuras eternas que aparentan. Luke Dones, del Instituto de Investigaciones del Sudoeste, en Boulder, Colorado, apunta que los de Saturno quizá procedan de la desintegración de una luna de 300 a 400 kilómetros de diámetro. Nacieran o no todos los anillos con violencia, hoy sabemos que no adoptaron su conformación actual de una vez por todas. No dejan de remodelarse. Joshua E. Colwell y Larry W. Esposito, de la Universidad de Colorado, han ofrecido un esquema del reciclado de material que tiene lugar entre los anillos y las lunas inmersas en ellos. Estas van arrastrando partículas que luego los choques más fuertes les arrancan de nuevo. Es posible que un equilibrio de esa naturaleza determine la extensión de muchos anillos. Las variaciones en composición, historia y tamaño de los planetas y satélites explicarían de forma natural su gran variedad.

La síntesis que está tomando forma da la causa de que casi ningún planeta interior tenga anillos: porque no cuentan con un gran número de satélites que porten el material. La Luna es demasiado grande y el campo gravitatorio solar y las fuerzas de radiación se llevan de ordinario el polvo microscópico que escapa de su superficie. Es probable que Marte, con sus dos satélites diminutos, tenga anillos. Pero dos de los autores (Hamilton y Showalter) no han visto ni anillos, ni satélites más pequeños en las imágenes tomadas el año pasado por el Hubble. Si hay un anillo marciano, será debilísimo, con un espesor óptico inferior a 10^{-8}.

En la ciencia es frecuente que los mismos principios básicos valgan para fenómenos que no parecían guardar relación alguna. Cabe considerar al sistema solar y a otros sistemas planetarios anillos gigantes en torno a una estrella. Se han visto indicios de la existencia de huecos y resonancias en los discos de polvo que rodean a otras estrellas; también hay pruebas de que en su seno orbitan cuerpos que aportan material. Las órbitas elípticas de muchos planetas gigantes extrasolares, muy cercanas a su estrella, se explican mejor si son el resultado final de la transferencia de momento angular entre estos cuerpos y unos discos de gran masa [*véase* “Migración planetaria”, por Renu Malhotra; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, noviembre de 1999]. Los anillos planetarios no son sólo estructuras exquisitas e impresionantes; quizá sean también las piedras de Rosetta con las que se descifrará el nacimiento de los planetas.

Bibliografía complementaria

THE FORMATION OF JUPITER’S FAINT RINGS. Joseph A. Burns et al., en *Science*, vol. 284, páginas 1146-1150; 14 de mayo, 1999.

STABILITY OF NEPTUNE’S RING ARCS IN QUESTION. Christophe Dumas et al., en *Nature*, vol. 400, páginas 733-735; 19 de agosto, 1999.

PLANETARY RINGS. Joseph A. Burns en *The New Solar System*. Cuarta edición, dirigido por J. Kelly Beatty, Carolyn Collins Petersen y Andrew Chaiken. Cambridge University Press, 1999.

Psicología de la adicción a la televisión

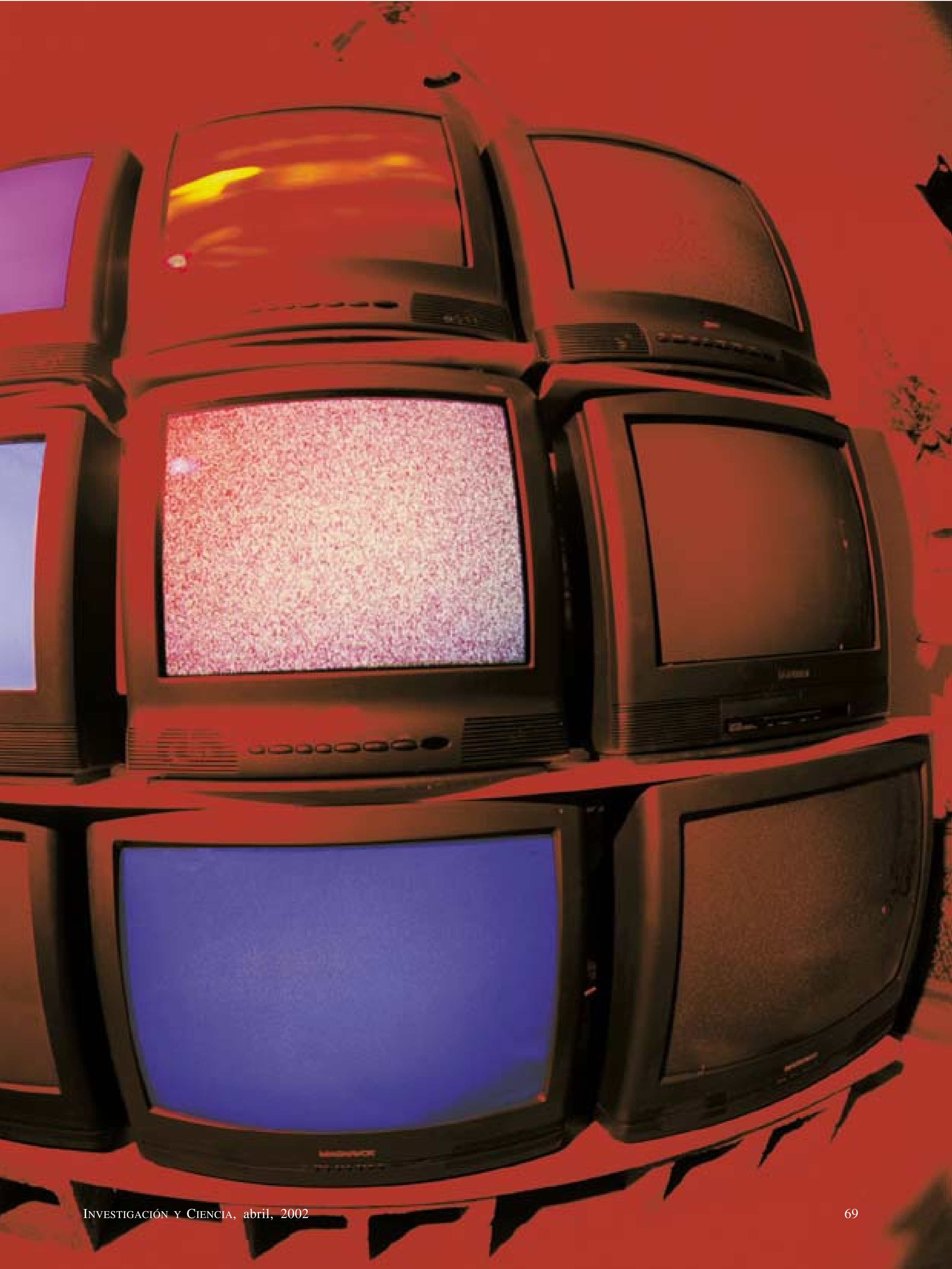
Ver de manera compulsiva la televisión recuerda mucho a otras formas de adicción. Saberlo quizás ayude a controlar ese hábito

Robert Kubey y Mihaly Csikszentmihalyi



A los seres vivos les perjudica muchas veces lo que desean; el cebo es la perdición de la trucha, el queso la del ratón. Quizá no haya otro aspecto más paradójico de la lucha por la supervivencia. Pero a esas criaturas, al menos, les excusa que el cebo y el queso parezcan alimentos. A los seres humanos, en cambio, rara vez les queda tal consuelo; las tentaciones que pueden echar a perder su vida no son a menudo más que puros caprichos: nadie *tiene que* beber alcohol, por ejemplo. Advertir cuándo una diversión se va de las manos es una de las grandes dificultades de la vida.

Las ansias excesivas no han de tener siempre por objeto sustancias físicas; también el juego y el sexo se convierten en obsesiones. Pero una actividad, el pasatiempo más popular del mundo, destaca de puro frecuente y ubicua: ver la televisión. La mayoría admite que siente una mezcla de amor y odio hacia ella. Los mismos que critican "la caja tonta" y a quienes se apoltronan ante ella se sientan después en el sofá y agarran el mando a distancia. Es común que a los padres les carcoma el tiempo



que sus hijos (si no ellos mismos) se pasan mirando la televisión. Hasta quienes se ganan la vida estudiando la televisión se maravillan de cómo les engancha. Percy Tannenbaum, de la Universidad de California en Berkeley, ha escrito: "Entre los momentos más embarazosos de mi vida se cuentan las innumerables ocasiones en que, conversando en un lugar donde estaba encendido un televisor, no he conseguido, por más que lo intentase, dejar de echar periódicas miradas a la pantalla. Y esto sucede no sólo durante conversaciones banales, sino también en las interesantes."

Hace docenas de años que los científicos estudian los efectos de la televisión. Por lo general se han centrado en si la violencia que emite hace violentos en la vida real; menos atención le han prestado al atractivo en sí de la pequeña pantalla (al medio, en contraposición al mensaje).

La expresión "adicto a la televisión" es imprecisa y está cargada de juicios de valor, pero capta la esencia de un fenómeno muy real. Psicólogos y psiquiatras definen formalmente la adicción a una sustancia como un trastorno caracterizado por varios criterios: el mucho tiempo que se ha estado tomándola; ingerirla más a menudo de lo que se querría; pensar en reducir su uso o hacer repetidos, pero inútiles, intentos de reducirlo; descuidar, por tomarla, importantes ocupaciones y actividades sociales o familiares; manifestar síntomas de penosa abstinencia cuando se deja de consumirla.

Pues bien, todos estos criterios son aplicables a las personas que ven mucho la televisión. Lo cual no quiere decir que verla sea en sí problemático. Puede instruir y entretener, alcanzar cimas estéticas, distraer de las preocupaciones. El problema surge cuando alguien piensa que no debería mirarla durante tanto tiempo, pero se siente a la vez extrañamente incapaz de dejar de hacerlo. Saber un poco cómo nos atrapa este medio quizás ayude a ser más dueños de sí a quienes le entregan una parte excesiva de su tiempo.

Un cuerpo en reposo tiende a permanecer en reposo

Es pasmoso el número total de horas que la gente se pasa mirando la televisión. En el mundo industrializado la media es de tres horas diarias, o sea, la mitad del tiempo libre; muchos individuos no hacen otra cosa en toda la jornada, aparte de trabajar y dormir. Según esto, quien viva hasta los 75 años se habrá pasado nada menos que 9 ante el televisor. Para algunos comentaristas, devoción tan singular no significa sino que las personas disfrutan con la televisión y deciden mirarla con plena consciencia. Pero si ésta es toda la historia, ¿por qué a tantos televidentes les preocupa la cantidad de tiempo que se pasan ante el receptor? En unos sondeos Gallup de 1992 y 1999, dos de cada cinco adultos y siete de cada diez adolescentes respondieron que dedicaban demasiado tiempo a ver la televisión. Otras encuestas han coincidido en que alrededor de un 10 % de adultos se declara adicto a la televisión.

Se han estudiado las reacciones de las personas a la televisión con experimentos de laboratorio en los que se registran las ondas cerebrales (mediante el electroencefalógrafo), la resistencia cutánea y el ritmo cardíaco de unos telespectadores. Para observar el comportamiento y las emociones, no en las condiciones artificiales del laboratorio, sino en el transcurso normal de la vida, los autores nos servimos del "método del muestreo de experiencias". Los participantes llevaban un avisador. Les llamábamos al azar de seis a ocho veces diarias, durante una semana; cada vez que oían el zumbido anotaban en una tarjeta normalizada qué estaban haciendo y cómo se sentían en ese momento.

Quienes estaban viendo la televisión cuando les enviábamos la señal contaban que se sentían relajados y pasivos. Era de esperar. Los estudios con electroencefalogramas han hallado también que la estimulación mental, medida por la producción de ondas cerebrales alfa, es menor mientras se mira la televisión que cuando se está leyendo.

Lo más sorprendente es que la sensación de calma se termina al apagar el televisor, pero no la pasividad. En las encuestas, los preguntados suelen decir que la televisión les ha absorbido las energías y que después de haber estado viéndola tienen más dificultad en concentrarse que antes. En cambio, rara vez notan tal dificultad después de leer. Tras hacer deporte o entretenerse con alguna afición mejora el estado de ánimo; tras ver la televisión se sienten más o menos como antes, o peor.

Los telespectadores afirman que a poco de haber encendido el televisor se sienten más relajados. Ese efecto se produce enseguida; por eso se asocia ver la televisión con el descanso y la ausencia de tensión. Refuerzan esta asociación un estímulo positivo —quien ve la televisión se siente relajado— y uno negativo —el estrés y las reflexiones deprimentes una vez se ha apagado el receptor.

Las drogas que crean hábito funcionan de un modo parecido. Es mucho más probable que cause dependencia un tranquilizante que abandona el cuerpo enseguida que otro que permanezca en él más tiempo: con el primero se es más consciente de que los efectos de la droga se van extinguiendo. De manera parecida, la vaga impresión que tienen los televidentes de que se sentirán menos relajados cuando dejen de mirar la televisión quizá sea una de las razones de que no lo hagan. Ver televi-

Los autores

ROBERT KUBEY y MIHALY CSIKSZENTMIHALYI se conocieron a mediados del decenio de 1970 en la Universidad de Chicago, donde Kubey comenzaba sus estudios de doctorado y Csikszentmihalyi era miembro del claustro. Kubey es ahora profesor de la Universidad de Rutgers y director del Centro de Estudios sobre los Medios. Centra sus trabajos en el desarrollo de la educación mediática en todo el mundo. Csikszentmihalyi profesa la cátedra de psicología C. S. y D. J. Davidson de la Universidad para posgraduados de Claremont y es miembro de la Academia Norteamericana de Artes y Ciencias.

PARA LIBRARSE DEL HABITO

Los individuos y las familias que quieran controlar mejor el tiempo que dedican a ver la televisión pueden poner en práctica las siguientes tácticas:

INCREMENTAR LA CONCIENCIACION. Como en otras dependencias, el primer paso es caer en la cuenta de hasta qué punto se ha llegado a estar atado al hábito de ver la televisión, de cuánto tiempo se pierde en eso, de qué poco gratifica. Puede que venga bien llevar durante unos cuantos días un diario donde se apunten todos los programas vistos. Las anotaciones podrían indicar la calidad de la experiencia, cuánto se ha disfrutado y cuánto se ha aprendido con cada uno de los programas.

PROMOVER ACTIVIDADES. Muchas familias se apresuran a encender el televisor en cuanto han acabado de cenar. A quienes quieran emprender actividades distintas a esa puede que les venga bien pegar en la nevera una lista de posibilidades. En vez de apoltronarse como de costumbre frente a la "caja tonta", pueden echar mano de la lista.

EJERCITAR LA FUERZA DE VOLUNTAD. En muchos casos, se sabe a los pocos minutos de tal programa o de la "película de la semana" que no merece la pena, pero en vez de apagar el televisor se aguantan las dos horas que dura. Es natural que se quiera saber qué sucederá, pero en cuanto se apaga el aparato y se dirige la atención a otras cosas rara vez le importa ya a nadie.

IMPONER UNOS LIMITES. Un medidor de tiempos de cocina viene bien para marcar un límite, sobre todo con los videojuegos. Cuando suena, los niños saben que han de parar. Que los padres marquen un plazo funciona peor, como algunos han descubierto por experiencia propia. Los pequeños se toman más en serio el timbre.

BLOQUEAR CANALES/CHIPS CONTRA LA VIOLENCIA. Los televisores llevan ahora unos microchips que impiden la visión de los programas violentos. Se les pueden conectar también algunos artificios electrónicos que cuentan las horas que cada miembro de la familia ha pasado ante el televisor e impiden su uso a quien sobrepase una determinada cuota.

VER CON CRITERIO. En vez de ir cambiando de canales, elíjanse los programas por anticipado consultando la programación.

USAR EL VIDEO. No vea el programa; grábelo para después. Muchos no ven nunca buena parte de lo grabado.

CORTAR POR LO SANO. Muchas familias han conseguido reducir el tiempo que se pasan ante el televisor decidiendo que en su hogar no haya más que uno, y además en un rincón apartado o en un cuarto reservado. Otras ponen fin a su suscripción a los canales de pago o se deshacen incluso de todos los televisores.

APOYAR LA EDUCACION MEDIATICA. En Canadá, en Australia y en un creciente número de estados de los EE.UU. las escuelas exigen que los alumnos sigan clases sobre el uso de los medios de comunicación. Esos cursos aguzan en los niños la capacidad de análisis de lo que ven y oyen; consiguen que utilicen la televisión y los otros medios de manera más reflexiva.

—R. K. y M. C.

sión fomenta que se vea más televisión.

Lo paradójico es que se está ante el televisor mucho más tiempo del que se querría, pese a que así gratifica menos. En nuestros muestreos de experiencias, cuanto más tiempo se pasaban los individuos frente al televisor, menos satisfacción decían que les daba. Los que, día tras día, estaban más de cuatro horas viendo la televisión manifestaban en sus cuestionarios una satisfacción menor que quienes la miraban más de paso (menos de dos horas diarias). Algunos sentían también pesares o remordimientos por no estar haciendo algo más productivo y no valoraban mucho el placer que sacaban de su hábito. Investigaciones hechas en Japón, en Inglaterra y en los EE.UU. han puesto de manifiesto que este sentimiento de culpa se da mucho más entre los telespectadores de clase media que entre los menos pudientes.

Captar la atención

¿Qué da la televisión, que tanto nos subyuga? La atracción parece dimanar, en parte, de nuestra biológica "reacción orientadora". La describió Ivan Pavlov en 1927; es nuestra instintiva respuesta visual o auditiva a cualquier estímulo inesperado o nuevo, una sensibilidad innata a los movimientos, a las posibles amenazas de los predadores, que forma parte de nuestra herencia evolutiva. Reacciones orientadoras típicas son la dilatación de los vasos sanguíneos cerebrales, la disminución del ritmo cardíaco y la constricción de venas y arterias en los músculos más importantes. Las ondas alfa se bloquean durante unos segundos antes de volver a su estado normal, determinado por el nivel general de actividad mental. El cerebro concentra su atención en reunir más información mientras el resto del cuerpo queda quieto.

En 1986 Byron Reeves, de la Universidad de Stanford, Esther Thorson, de la de Missouri, y sus colaboradores se preguntaron si los elementos formales del lenguaje de la televisión —cortes, cambios de encuadre, *zooms*, giros de la cámara, ruidos repentinos— activan la respuesta orientadora y atraen la atención hacia la pantalla. Observaron que influían en las ondas cerebrales. Su conclusión fue que esos ardides estilísticos disparan reacciones involuntarias, cuya "capacidad de atraer la atención deriva del significado evolutivo de la detección de movimientos... La singularidad de la televisión estriba en su forma, no en su contenido".



La reacción orientadora explica en parte comentarios de los telespectadores habituales del siguiente tenor: “Si está puesto un televisor, casi me es imposible apartar los ojos del mismo.” “No quisiera ver tanta televisión como veo, pero no lo puedo evitar.” “Cuando la estoy viendo me siento hipnotizado.” Desde la publicación por Reeves y Thorson de su trabajo pionero se ha profundizado más. El equipo de Annie Lang, de la Universidad de Indiana, ha comprobado que el ritmo cardíaco disminuye a los cuatro o cinco segundos de recibirse un estímulo orientador. En los anuncios, en las secuencias de acción y en los vídeos musicales suele presentarse un elemento formal nuevo por segundo; la reacción orientadora se activa así sin parar.

Lang y sus colegas han investigado también si los elementos formales afectan al recuerdo de lo visto. En uno de sus estudios, los individuos veían un programa y rellenaban un cuestionario. Cuando aumentaba la frecuencia de los cambios de encuadre —definidos aquí como el paso de un ángulo de toma a otro en una misma escena visual—, mejoraba el reconocimiento memorístico; cabe presumir que de esa forma se logra que la atención se centre en la pantalla. El aumento de la frecuencia de los cortes —cambios a otra escena visual— ejercía un efecto parecido, pero sólo hasta llegar a cierto punto. Si en dos minutos había más de diez cortes, el recuerdo disminuía mucho.

Los productores de programas infantiles educativos se han percatado de que los elementos formales del lenguaje de la televisión ayudan a aprender. No obstante, el número de cortes y encuadres por minuto puede llegar a sobrecargar el cerebro. Los vídeos musicales y los anuncios comerciales, con sus rápidas mezclas de escenas que no guardan relación entre sí, están más pensados para captar la atención que para transmitir información. Quizá se recuerde el nombre del producto o del grupo musical, pero los detalles del anuncio mismo entran por un oído y salen por otro. Se ha exigido demasiado a la reacción orientadora. Los espectadores siguen atentos a la pantalla, pero se sienten abrumados y cansados, poco compensados psicológicamente. Nuestros muestreos vienen a decir lo mismo.

A veces, el recuerdo del producto es muy sutil. Muchos anuncios son hoy a sabiendas indirectos: el argumento se gana al espectador, pero no es fácil decir qué están tratando de vender. Quizá no se recuerde luego el producto conscientemente. Sin embargo, los anunciadores creen que, si han conseguido captar la atención, después, en la tienda, el cliente se sentirá más a gusto con el artículo porque tendrá la vaga impresión de que ha oído hablar de él.

La natural atracción hacia el sonido y la luz de la televisión empieza a muy tierna edad. Según Dafna Lemish, de la Universidad de Tel Aviv, hay niños que ya les prestan atención a las seis u ocho semanas. Hemos visto criaturas sólo un poco mayores que, tumbadas en el suelo, tuercen la cabeza 180º para ver las luces de esa ventana de por allá. Esta inclinación da a entender cuán profundamente tenemos arraigada la reacción orientadora.

“La televisión forma parte de ellos”

Dicho esto, cuidémonos de exagerar. No hay muchas razones para pensar que adultos o niños deban dejar del todo de ver televisión. Los problemas vienen del exceso. El método del muestreo de experiencias nos permitió observar de cerca casi todos los aspectos

de la vida cotidiana: trabajar, comer, leer, charlar con los amigos, hacer deporte... Nos preguntamos si los que ven mucha televisión experimentan la vida de modo diferente que los que ven poca. ¿Les molesta más estar con la gente? ¿Les desagrada más su trabajo? Los datos hablaban por sí solos. Los telespectadores empedernidos declaran sentirse bastante más ansiosos y menos felices que los más moderados cuando se encuentran en una situación amorfa: no hacer nada, soñar con los ojos abiertos, esperar en una cola. La diferencia es mayor cuando el telespectador está solo.

Con posterioridad, Robert D. McIlwraith, de la Universidad de Manitoba, estudió por extenso a quienes decían de sí mismos en las encuestas que eran adictos a la televisión. Conforme a un método de evaluación, el "catálogo breve para los procesos de imágenes interiores", se descubrió que los que se consideran a sí mismos adictos se aburren y distraen con facilidad. Controlan peor su atención que quienes no lo son y afirman que se valen de la televisión para olvidar ideas desagradables y matar el tiempo. Otros estudios posteriores han demostrado que están menos dispuestos a participar en actividades comunitarias y a practicar deporte. Es más probable, además, que sean obesos.

La pregunta natural es: ¿en qué dirección va la correlación?, ¿se recurre a la televisión a causa del hastío y la soledad, o verla hace a las personas más propensas al hastío y a la soledad? Nosotros, con la mayoría de los investigadores, sostenemos que, en líneas generales, es cierto lo primero, pero la verdad es que no se trata de un mero o lo uno, o lo otro. Jerome L. y Dorothy Singer, de la Universidad de Yale, entre otros, han apuntado que el ver más televisión puede contribuir a que se mantenga menos tiempo la atención, disminuya el dominio de sí y se pierda la paciencia en esos momentos de la vida diaria en que toca esperar. Hace más de 25 años, la psicóloga Tannis M. MacBeth Williams, de la Universidad de la Columbia Británica, estudió un pueblo de montaña que no había tenido televisión hasta que, al fin, le llegó el cable. No mucho después, los adultos y los niños de aquella población aguantaban peor los tiempos vacíos y se habían vuelto menos creativos en la resolución de problemas, menos perseverantes en el trabajo.

Según algunos investigadores, el síndrome de abstinencia que sufren quienes reducen las horas que se pasan ante el televisor es la prueba más convincente de la afinidad entre la televisión y las drogas que crean adicción. Hace casi 40 años, Gary A. Steiner, de la Universidad de Chicago, recogió los apasionantes testimonios de algunas familias a las que se les había estropeado el televisor —por entonces no solía haber más de uno en cada hogar—: "No hacíamos más que dar vueltas como pollos degollados." "Fue algo terrible. No hacíamos nada... Mi marido y yo hablábamos." "Gritábamos sin parar. Los niños me sacaban de quicio, tenía los nervios de punta. Trataba de que se interesaran en algún juego, pero era imposible: la televisión forma parte de ellos."

Se ha hecho varias veces el experimento de que una familia, por su propia voluntad o pagada, dejase de ver televisión durante una semana o un mes. Muchas no pudieron completar el período de abstinencia. Algunas llegaron a pelearse, verbal y físicamente. Las historias que se han contado de familias que hicieron caso a la campaña anual "apague su televisor por una semana" (este año toca del 22 al 28 de abril) abundan en lo mismo.

Si una familia ha estado empleando la mayor parte de su tiempo en ver la televisión, reorganizarse en torno a nuevas actividades no le será fácil. Esto no quiere decir, desde luego, que no pueda hacerse, o que todas las familias vayan a hundirse si se las priva del televisor. Charles Winick, de la Universidad municipal de Nueva York, llegaba en su repaso de los estudios del efecto de la privación a esta conclusión: "Para la mayoría, hasta en muchas casas donde había otras actividades y se dedicaba un tiempo mínimo a ver la televisión, los tres o cuatro primeros días fueron los peores: en más de la mitad de los hogares se perturbaron las rutinas cotidianas, resultó difícil aprovechar el nuevo tiempo de que se disponía, se expresaron ansiedades y exabruptos... Las personas que vivían solas propendían a estar cansadas e irritadas... Durante la segunda semana se fueron adaptando, por lo común, a la situación." Desgraciadamente, no se ha sacado aún todo su jugo a estas anécdotas; todavía hay que recoger de manera sistemática datos estadísticos sobre la frecuencia de esos síntomas de abstinencia.

Aunque la televisión parece cumplir los requisitos para que se considere que crea adicción, no todos llegan a tanto. McIlwraith declaraba en 1998: "Que la televisión desplace a otras actividades quizá tenga una importancia social, pero dista de cumplir el criterio clínico de que cause un trastorno grave." Sostenía que no había por qué crear una categoría nueva, la "adicción a la televisión", si el número de horas excesivo ante el televisor se debía a un estado morboso, una depresión, una fobia social. No obstante, diagnostiquemos o no que alguien sufre dependencia de la televisión, lo cierto es que hay millones de personas a las que les resulta difícil controlar el tiempo que se pasan viéndola.

Esclavizados por la pantalla del ordenador

Aunque los videojuegos y el uso del ordenador se han investigado mucho menos, a menudo se les pueden aplicar los mismos principios. Los videojuegos ofrecen evasión y distracción. Los jugadores no tardan en darse cuenta de que se sienten mejor mientras juegan; se desarrolla así una especie de bucle de refuerzo. Pero su interactividad los diferencia claramente de la televisión. La dificultad de muchos videojuegos y juegos de ordenador se va graduando muy poco a poco a medida que mejora la habilidad del jugador. Si alguien quiere jugar al tenis o al ajedrez con un contrincante de habilidad comparable a la suya, tal vez haya de buscarlo durante meses; en cam-

bio, los juegos informáticos le proporcionan en un momento un rival que tiene más o menos su misma destreza. Los videojuegos rinden el placer psíquico —la "corriente", como dice uno de nosotros (Csikszentmihalyi)— que acompaña en la mayoría de las empresas humanas a un mayor dominio de lo que se está haciendo. Por otro lado, una prolongada activación de la respuesta orientadora puede agotar a los jugadores. Al final de una sesión larga los niños dicen sentirse cansados, mareados y con náuseas.

En 1997, en el efecto más extremado de un medio de que haya constancia, hubo que llevar al hospital con urgencia a 700 niños japoneses; sufrían "ataques epilépticos estimulados ópticamente" tras haberlos sometido la televisión a las brillantes ráfagas luminosas de un episodio de Pokémon, serie que es también un juego de ordenador. La magnitud de esos ataques y de otros efectos perjudiciales de los videojuegos ha obligado a los fabricantes de los programas y de las consolas a incluir en los manuales de instrucción advertencias al respecto. Algunos padres nos han hecho saber que los rápidos movimientos que se ven en la pantalla han causado en sus hijos de poca edad mareos cuando sólo llevaban jugando 15 minutos. Muchos niños, carentes de autocontrol y de experiencia (y a menudo sin nadie que los vigile), siguen jugando a pesar de los síntomas.

Lang y Shyam Sundar, de la Universidad estatal de Pennsylvania, han estudiado las reacciones a los sitios de la Red. Sundar enseñaba diversas versiones de una misma página que diferían entre sí sólo por el número de enlaces. Las personas sometidas a la prueba decían que el contar con más enlaces les daba más sensación de control y de participación. En cierto momento, sin embargo, su cantidad llegaba a la saturación y añadir más sólo hacía que se retrajeran. Igual que ocurre con los videojuegos, los sitios de la Red cautivan la atención del usuario más por la interactividad que por los elementos formales de su presentación.

Quizás haya cada vez más personas a las que con frecuencia les parezca más importante, más cercana y más intensa su vida mientras están conectadas a la Red que en el trato cara a cara con sus semejantes. Nunca ha sido más difícil mantener el propio control sobre los medios de comunicación. Estamos rodeados de televisores y de ordenadores, pero es preciso que ni la pequeña pantalla ni Internet estropeen la calidad de los demás aspectos de la vida. La televisión es una forma sencilla de evadirse y relajarse; verla con moderación puede ser beneficioso. Mas si la costumbre menoscaba la capacidad de desarrollarse, de aprender cosas nuevas, de llevar una vida activa, se convierte en una especie de dependencia que hay que tomar en serio.

Bibliografía complementaria

TELEVISION AND THE QUALITY OF LIFE: HOW VIEWING SHAPES EVERYDAY EXPERIENCE. Robert Kubey y Mihaly Csikszentmihalyi. Lawrence Erilbaum Associates, 1990.

TELEVISION DEPENDENCE, DIAGNOSIS, AND PREVENTION. Robert W. Kubey en *Tuning in to Young Viewers: Social Science Perspectives on Television*. Dirigido por Tannis M. MacBeth. Sage, 1995.

"I'M ADDICTED TO TELEVISION": THE PERSONALITY, IMAGINATION, AND TELEVISION WATCHING PATTERNS OF SELF-IDENTIFIED TELEVISION ADDICTS. Robert D. McIlwraith en *Journal of Broadcasting and Electronic Media*, vol. 42, n.º 3, págs. 371-386; verano de 1998.

THE LIMITED CAPACITY MODEL OF MEDIATED MESSAGE PROCESSING. Annie Lang en *Journal of Communication*, vol. 50, n.º 1, págs. 46-70; marzo 2000.

INTERNET USE AND COLLEGIATE ACADEMIC PERFORMANCE DECREMENTS: EARLY FINDINGS. Robert Kubey, Michael J. Lavin y John R. Barrows en *Journal of Communication*, vol. 51, n.º 2, págs. 366-382; junio de 2001.

Vitrificación de residuos radiactivos

El aislamiento de residuos radiactivos se ha convertido en un problema crítico de la técnica nuclear. Se confía en el método de vitrificación cerámica para inmovilizar y tornar inertes esos desechos

J. M.ª Rincón y M. Romero

Existe en la sociedad una sensibilidad creciente ante todo lo que se relacione con la conservación del entorno. Talante promovido en buena medida por la ciencia. En ese contexto se han multiplicado las investigaciones sobre el desarrollo de nuevas técnicas que permitan no sólo producir menor cantidad de residuos y menos contaminantes, sino también resolver los problemas asociados a su reciclado.

Según datos de la compañía ENRESA, cada año se generan en España unas 150 toneladas de residuos de alta radiactividad, que proceden fundamentalmente del combustible nuclear gastado en las centrales. Tales residuos se vienen almacenando desde hace años de forma temporal en las piscinas de los reactores.

En un reactor de tamaño medio, de unos 1000 megawatt, se generan unas 30 toneladas de residuos radiactivos de alta actividad. Suponen el 95 % de la radiactividad producida por desechos. En España se han generado, hasta la fecha, unas 1500 toneladas de residuos radiactivos de alta actividad, cuya gestión entraña un grave problema.

En Estados Unidos, la ley impone mezclar tales residuos con vidrio a fin de poder retirarlos a un cementerio adecuado. Y se prevé la construcción de un cementerio en Yucca para unos 6000 bloques vitrificados. En otros países con una importante industria nuclear se fomenta el desarrollo de matrices (cementos, cerámicas, vidrios y vitrocerámicas) que, procesadas adecuadamente, garanticen la inmovilización de los residuos.

La inmovilización pasa por la conversión de los residuos en sólidos estables. Confinados, luego, en barreras geológicas apropiadas, se busca evitar el retorno de los radioisótopos a la biosfera en niveles o dosis significativamente mayores que su uso inicial. Para ello, deben cumplir una serie de requisitos, que van desde una gran estabilidad química y termodinámica hasta una buena resistencia a la radiación, sin olvidar la facilidad de fabricación y manipulación, la posibilidad de admitir proporciones elevadas de residuos y ser afines al material geológico que sirva de roca encajante. Esas mismas condiciones podrían exigirse en el caso del aislamiento de residuos tóxicos industriales, no radiactivos.

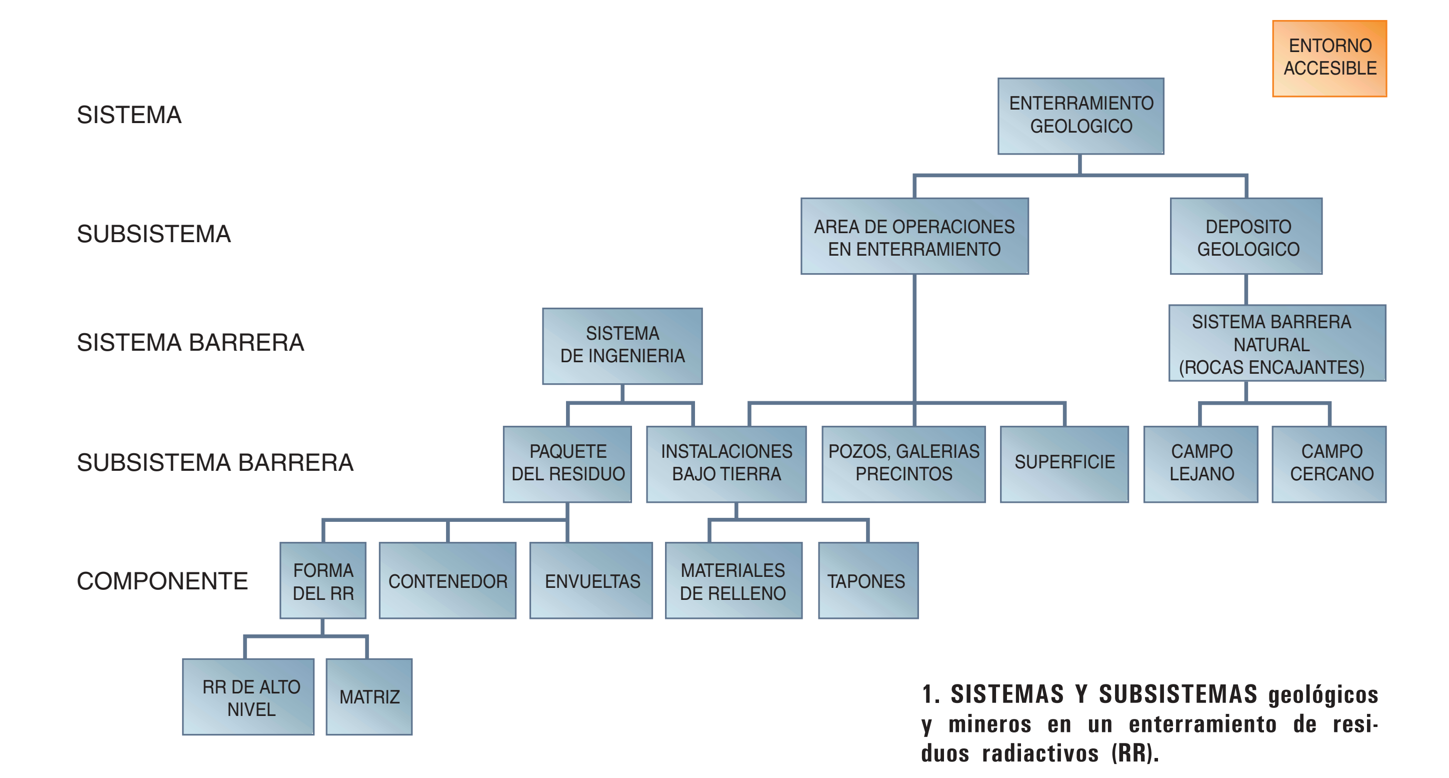
Con el almacenamiento geológico profundo se pretende crear un tipo de caja fuerte para los residuos radiactivos durante unos 100.000 años, tiempo que tardan en degradarse hasta el nivel de la radiación natural. En Suecia se han dado progresos significativos para el almacenamiento profundo en macizos graníticos.

Otro de los procedimientos que se ofrecen para mantener inertes los residuos radiactivos es el denominado ciclo cerrado y avanzado de tratamiento. Consiste en recurrir a procesos de transmutación provocados para transformar isótopos de vida larga en otros de vida corta o estable, induciendo la reacción por un bombardeo con neutrones.

El procedimiento de ciclo cerrado puede acometerse según el método de reprocesado del combustible irradiado (proceso PUREX). Los residuos líquidos de alta actividad producidos como consecuencia del reprocesado contienen

Los autores

JESUS M.ª RINCON y MAXIMINA ROMERO son miembros del grupo de investigación en materiales vitrocerámicos que dirige el primero en el Instituto Eduardo Torroja, del Consejo Superior de Investigaciones Científicas. Rincón, doctor en ciencias químicas y pionero de la investigación de materiales vitrocerámicos en España, campo en el que viene laborando desde hace 30 años, ha sido profesor invitado de la Universidad de California en Berkeley. Romero, tras doctorarse en ciencias químicas por la Universidad de Alcalá de Henares, trabajó en el departamento de materiales del Colegio Imperial de Londres. Su línea de trabajo se centra en el procesado y la caracterización de materiales cerámicos y vítreos.



1. SISTEMAS Y SUBSISTEMAS geológicos y mineros en un enterramiento de residuos radiactivos (RR).

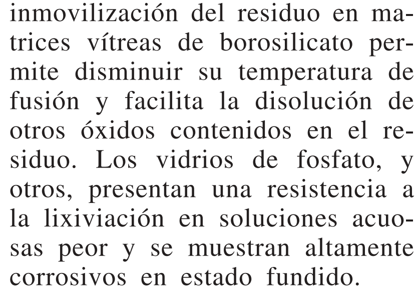
la mayoría de los productos de fisión y actínidos; los segundos pueden, luego, someterse a vitrificación y almacenamiento definitivo.

En un procesado por ciclo abierto, se almacenarían directamente los residuos en una formación geológica adecuada.

Proceso de vitrificación

El vidrio dura más que el cemento. Durabilidad de la que podrían beneficiarse composiciones variables de residuos. Su estabilidad térmica y versatilidad de procesado son otras propiedades a tener en cuenta. Por último, la vitrificación ofrece la ventaja de una considerable reducción de volumen de los residuos, con lo que su almacenamiento en formas sólidas lo hace más seguro y manejable.

El proceso de vitrificación consiste en mezclar el residuo radiactivo con una matriz vítrea encapsulante. La matriz admite múltiples sistemas de composición. A escala industrial sólo se han desarrollado los vidrios de borosilicato o los de alumino-borosilicato. La adición del óxido B_2O_3 (que supone entre un 9 % y un 20 % sobre la composición total del vidrio) mejora la resistencia hidrolítica del material compuesto. La



inmovilización del residuo en matrices vítreas de borosilicato permite disminuir su temperatura de fusión y facilita la disolución de otros óxidos contenidos en el residuo. Los vidrios de fosfato, y otros, presentan una resistencia a la lixiviación en soluciones acuosas peor y se muestran altamente corrosivos en estado fundido.

Los vidrios con altos contenidos en sílice, aunque perduran más que los borosilicatos, resultan viables para la inmovilización de residuos porque tienen altos puntos de reblandecimiento; además, su poder de disolución de los iones de residuos radiactivos es menor que el de los borosilicatos.

Para superar las limitaciones de los vidrios de borosilicato se han desarrollado técnicas que permiten aplicar el proceso vitrocerámico por vía petrúrgica o por vía vitrocerámica propiamente dicha, para el reciclado de residuos. Los materiales vitrocerámicos, intermedios entre los vidrios y los cerámicos, se procesan por los procedimientos habituales en la industria del vidrio, aunque sometiéndolos a un pro-



2. PLANTA PILOTO de vitrificación de residuos de origen minero e hidrometalúrgico, diseñada y puesta en marcha con un Proyecto Europeo Brite/Euram.



3. PLAQUETAS DE GRES vitrocerámico obtenidas a partir de residuos de goethita (*arriba*) y jarosita (*abajo*), junto a una pieza de material vitrocerámico de basalto antidesgaste (*pieza con superficie ondulada*).

ceso de tratamiento térmico posterior. En éste, por un mecanismo de nucleación y crecimiento cristalino, se produce la precipitación de un porcentaje determinado de cristalitos en la matriz vítrea, lo que confiere al material mejores propiedades físicas y técnicas que el vidrio de partida.

Abundan en la vida diaria útiles creados con materiales vitrocerámicos. Algunas encimeras de cocinas están constituidas por cristalitos de beta-espodumena (un mineral de silicato de aluminio y litio con muy bajo coeficiente de dilatación térmica y, por tanto, con alta resistencia al choque térmico) embebidos en una matriz vítrea. Para el revestimiento de fachadas de edificios se utilizan en Japón materiales de roca sintética de tipo vitrocerámico. En nuestro laboratorio se han ensayado esmaltes cerámicos hechos de vidriados de basaltos y, más recientemente, materiales y vitrocerámicos sintéticos a partir de lodos de goethita y de otros residuos de industrias hidrometalúrgicas.

La incorporación de matrices vitrocerámicas como vía alternativa para la inmovilización y almacenamiento de residuos se debe a sus propiedades singulares: en un mismo material se engloban las ventajas de las matrices de tipo vítreo y se obvian los inconvenientes de las de tipo cerámico o de base cemento.

En el caso de una matriz de tipo vítreo, ésta se crea por un proceso de fusión y colado del fundido; mientras que en una matriz vitrocerámica el proceso implica un tratamiento térmico adicional de nucleación y cristalización de fases cristalinas.

Destacan tres tipos principales de matrices vitrocerámicas: de rocas ígneas o de basalto, de esfena y de polucita. Las matrices vitrocerámicas de esfena (titanato de calcio), termodinámicamente esta-

4. COMPARACION DE LA LIXIVIACION estática de diferentes elementos químicos en varias matrices para el aislamiento de un residuo radiactivo que contiene Pu^{230}.

ELEMENTO LIBERADO (g/m^3)	MATERIAL				
	CEMENTO PRENSADO EN FRIO	VC PRENSADO EN FRIO Y SINTERIZADO	VIDRIO BOROSILICATO	VIDRIO ALUMINO-SILICATO	VC DE BASALTO BGC-50
Al	8,2	0,4	3	3	0,2
Fe	0,03	<	<	2	<
Ca	30	9	5	6	1
Na	1300	4	15	9	2
Si	5	1	12	7	1
Pu	0,001	0,01	0,003	0,005	0,003
pH	11,7	5,4	9,5	8,7	5,6

VC: Matriz vitrocerámica

COMPOSICION QUIMICA % EN PESO		COMPOSICION MINERALOGICA % EN PESO (NORMA CIPW)	
SiO_2	44-50	Ortosa (Or)	6-27
TiO_2	1-3	Albita (Ab)	8-30
Al_2O_3	14-16	Anortita (An)	16-20
Fe_2O_3	3-4	Nefelina (Ne)	2-13
FeO	5-8	Diópsido (Di)	11-22
MnO	0,1-0,2	Hiperstena (Hy)	0-16
MgO	4-9	Olivino (Ol)	1-13
CaO	7-10	Magnetita (Mt)	5-7
Na_2O	3-4	Ilmenita (Il)	3-5
K_2O	1-5	Apatito (Ap)	0-2
H_2O^+	0,9-1,2	Calcita (Cc)	0-0,5
H_2O^-	0,2-0,5		
P_2O_5	0,3-1,0		
CO_2	0-0,2		

5. COMPOSICION Y MINERALOGIA de las rocas basálticas.

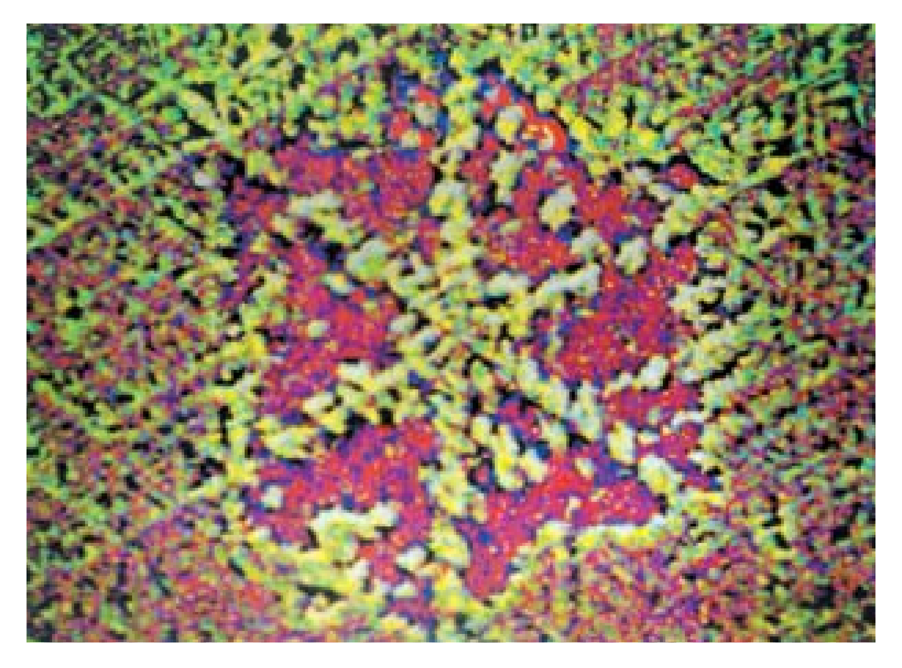
bles, permitirían resolver muchos de los problemas relativos a la variación de composición, resistencia a la radiación y dificultades de la producción industrial, tales como la manipulación y prensado de polvos, así como en el proceso cerámico tradicional. Las matrices vitrocerámicas de polucita (un silicato de aluminio y cesio) presentan una alta estabilidad térmica (hasta los 1600 ºC), resistencia a la corrosión, expansión térmica de baja a moderada y porosidad cero.

Matrices vitrocerámicas

Sin embargo, se está prestando atención creciente a las matrices vitrocerámicas de composiciones basálticas con cristalizaciones piroxénicas, sobre todo si se trata de inmovilizar residuos que contienen elementos transuránicos, los más peligrosos a largo plazo. Tales matrices se caracterizan por sus bajas velocidades de lixiviación y su insensibilidad al tiempo, temperatura y proceso de almacenamiento. Una vez recristalizadas las matrices, proceso que consiste en fundir un vidrio de partida mezclado con el residuo en su composición y someterlo posteriormente a tratamientos térmicos de cristalización, no cambia la tasa de lixiviación por variaciones en los tratamientos térmicos o en el almacenamiento del residuo, debido a que su microestructura (fase cristalina más fase vítrea residual) se adapta a las variaciones de composición.

Las matrices vitrocristalinas de piroxeno son muy versátiles en su composición y aceptan la incorporación de metales pesados en su estructura cristalina. En nuestro laboratorio hemos comprobado la eficacia de tales matrices en la inmovilización de estroncio, uno de los elementos que contiene un isótopo de los de mayor vida media.

El uso preferente de rocas de tipo ígneo en la producción de materiales vitrocerámicos se debe a la relativa mayor constancia de la composición química y homogeneidad mineralógica, que favorecen el procesamiento posterior. A su vez, la elección de rocas basálticas viene determinada por su menor temperatura de fusión y la mayor fluidez del fundido, lo que, *a priori*, las hace más aptas para su procesado vitrocerámico. Una roca de tipo basáltico puede tener ocho o nueve minerales normativos, pero después de la fusión y de la recristalización no suelen aparecer más que tres o cuatro fases, fundamentalmente: magnetita, un piroxeno de tipo diópsido, a veces plagioclasa (labradorita-anortita) y, también a veces, olivino. Los puntos de fusión de estos minerales suelen variar desde los 1118 ºC de la albita hasta los 1686 ºC de la leucita. En su mayoría sobrepasan los 1500 ºC. La fusión de sus mezclas disminuye las temperaturas de fusión de la roca (1100 ºC-1300 ºC).



6. MICROESTRUCTURA observada por microscopía electrónica de barrido en un material vitrocerámico obtenido a partir de lodos de goethita en el Laboratorio de Materiales Vitrocerámicos del Instituto Torroja del CSIC. En la misma se pueden ver cristalizaciones dendríticas de un diópsido piroxénico sintético decorado con cristalitos (*granos blancos*) de magnetita.

7. VENTAJAS (+) e inconvenientes (–) del proceso de vitrificación para el encapsulado de residuos radiactivos de alta actividad.

	CEMENTO/HORMIGON	VITRIFICACION
PROCESADO	+	–
DISEÑO DE COMPOSICION	–	+
DURABILIDAD	–	+
RESISTENCIA A LA FLEXION	+	–
RESISTENCIA AL ROCE	–	+
POROSIDAD	–	+
EFECTO DE LA RADIACION	+	–
COSTES	+	–

	CERAMICA	VITREA	VITROCERAMICA
PROCESO	–	+	+
DURABILIDAD	+	–	+
PROPIEDADES MECANICAS	+	–	+
CONDUCTIVIDAD TERMICA	–	+	+
COSTES	–	+	+
EFECTO DE LA RADIACION	+	–	+
GRADO DE I+D	+	+	+

+ MAS VENTAJOSO — MENOS VENTAJOSO

El orden de aparición y desarrollo de estas fases, por debajo de los 1300 ºC, depende de los tratamientos térmicos aplicados.

Si los tratamientos quedan incluidos en el curso de un enfriamiento lento del fundido original desde la temperatura de líquido, entonces la aparición sucesiva de fases minerales se da por mecanismos similares a los que, de manera natural, originan la formación de las rocas ígneas. En ese proceso petrúrgico la cristalización tiene lugar en el enfriamiento del fundido. Pero si, una vez obtenido el vidrio, se aplican tratamientos térmicos desde bajas temperaturas (≈ 500 ºC), se provoca una desvitrificación o recristalización secundaria en el vidrio de partida.

Ambas posibilidades deben considerarse para determinar los intervalos de aparición de cada fase, que varían mucho. Los piroxenos oscilan entre 800 ºC-1180 ºC; la magnetita, fases de titanatos de hierro o ambos, entre 700 ºC-1300 ºC; las plagioclasas entre 1050 ºC-1150 ºC, y los olivinos entre 900 ºC-1250 ºC.

En el caso del residuo generado durante la recuperación de plutonio y uranio, con cerca de 40 elementos, se almacena en un vidrio constituido por más de la mitad de la tabla periódica de los elementos químicos. El residuo se neutraliza con hidróxido de sodio y se forma así una papilla gelatinosa en el fondo de los tanques, que contienen, aparte del residuo radiactivo, varios compuestos de Al, Fe y Mn.

Se prepara, además, una solución salina, la supernata, que consta de nitrato de sodio, nitrito sódico y cesio 137 radiactivo que es muy soluble. La supernata se evapora y se convierte en una pastilla salina.

Antes de la vitrificación, se separan los elementos radiactivos de los que no lo son. Se asegura que sean éstos los que se vitrifiquen. Los elementos no radiactivos se almacenan en cemento. El residuo radiactivo que resulta de la separación anterior se mezcla con una frita de vidrio de borosilicato de sodio y se envía a un horno de efecto Joule que funde todo a unos 1200 ºC, colando el fundido en un recipiente o contenedor de 1,8 kg a una velocidad de 100 kilogramos por hora. El vidrio fundido se cuela en contenedores de acero inoxidable de unos 60 cm de diámetro y 3 m de alto, con capacidad para unos 1600 kg de vidrio de residuo. Después, los contenedores se tapan con una papilla de frita vítrea para descontaminar la superficie y luego se sellan con un tapón de acero. Los contenedores se almacenan temporalmente en la instalación de vitrificación antes de su transporte a una instalación geológica profunda.

El proceso vitrocerámico y, también, los procedimientos habituales en la industria cerámica y vítrea, aplicados para el reciclado de residuos minerales (escombreras y estériles de minas) e industriales (lodos de goethita y otros de la industria metalúrgica), son pues, una alternativa válida y posiblemente la más prometedora para el aislamiento de residuos radiactivos.

Bibliografía complementaria

MICROSTRUCTURE CHARACTERIZACION OF BASALT GLASS-CERAMICS. M. Hidalgo, P. Callejas y J. M.ª Rincón, en *Ceramic Microestructure '86*. Dirigido por J. Pask y A. Evans, Plenum Publishing Corporation, págs. 117-126, Berkeley, 1988.

GLASSES AND GLASS-CERAMICS FOR NUCLEAR WASTE MANAGENT. J. M.ª Rincón, Ed. CIEMAT, 2ª edición de la Soc. Esp. De Cerámica y Vidrio, 1991.

LA VITRIFICACIÓN/DESVITRIFICACIÓN CONTROLADA APLICADA AL AISLAMIENTO Y/O RECICLADO DE RESIDUOS INDUSTRIALES. M. Romero, y J. M.ª Rincón, en *Innovación Química*, marzo, págs. 65-68, 1996.

CERAMICS APPLICATIONS IN THE CERAMIC INDUSTRY. J. E. Marra, D. Thomas Rankin y G. G. Wicks, en *Ceramic Technology International*, págs. 47- 51, Ed. Sterling Publications Ltd, 1997.

SEPARACIÓN Y TRANSMUTACIÓN DE RADIONÚCLIDOS DE VIDA LARGA. A. Uriarte, en *Estratos*, primavera, págs. 22- 27, 1999.

Astronomía otomana

Al hilo de la lectura de un repertorio, el autor va desgranando los puntos capitales de la astronomía en un período apenas conocido

Julio Samsó

Todo empezó con la invitación de los editores de *Investigación y Ciencia* a que reseñara *Osmanli Astronomi Literatürü Tarihi (History of Astronomy Literature during the Ottoman Period)*, obra en dos volúmenes coordinada por Ekmeleddin Ihsanoğlu y publicada en Istambul por la Islâm Tarih, Sanat ve Kültür Araştirma Merkezi (IRCICA). La aceptación me ha llevado a intentar una tarea que, en teoría al menos, resulta poco aconsejable: reflexionar en torno a un libro de casi mil quinientas páginas escrito en una lengua que no entiendo en absoluto. Los dos volúmenes están escritos en turco con tan sólo una brevísima introducción en inglés. La verdad es que empecé la experiencia de pasar páginas de estos dos volúmenes con la clara impresión de estar llevando a cabo una total insensatez. Sin embargo, a la hora de la verdad, la operación ha resultado bastante fructífera. Por una parte se trata de un repertorio biobibliográfico de astrónomos que vivieron en Anatolia durante el período salǧūqī (pre-otomano) y, a continuación, en tierras pertenecientes al Imperio Otomano. Los límites cronológicos son, aproximadamente, c. 1400 y 1962.

En los territorios otomanos se utilizaban básicamente tres lenguas de cultura: evidentemente el turco, pero también el árabe y el persa. Dado que Ihsanoğlu y colaboradores han pretendido describir con un cierto detalle la bibliografía astronómica de cada autor, incluyendo una relación de los manuscritos en los que se conserva cada obra, suelen transcribir los *incipits* y, a veces, un breve índice. Como una buena parte de los textos transcritos están en árabe, no he tenido mayor dificultad en entenderlos. Por otra parte, en lo que se refiere a los textos turcos y persas, he podido comprobar algo que ya sabía en teoría. En el mundo islámico medieval el árabe funcionó de modo similar al inglés en la actualidad: era la lengua común que comprendían y, frecuentemente, utilizaban todos los científicos, razón por la cual la mayoría de los términos técnicos astronómicos que aparecen en los textos turcos y persas son árabes y no es difícil ver de qué trata un texto, incluso cuando está escrito en una lengua que desconozco.

Los dos tomos vienen a llenar un vacío importante para la historia de la astronomía. Hace ya muchos años que disponemos de repertorios biobibliográficos de matemáticos y astrónomos árabes (H. Suter, 1900) y, específicamente, andalusíes (J. A. Sánchez Pérez, 1921). A esto hay que añadir, para la Edad Media, la gran obra de G. Sarton (1927-1948) y las historias de la literatura árabe (C. Brockelmann, 1937-1949) y persa (C. A. Storey, 1927), que incluyen una relación muy completa de textos científicos. En fecha más reciente F. Sezgin está poniendo al día la obra de Brockelmann y publicó, en 1978, un espléndido volumen sobre la astronomía en árabe hasta mediados del siglo XI.

Por otra parte nuevas revisiones sistemáticas de la labor de Suter han sido llevadas a cabo, en ruso, por B. A. Rosenfeld y G. A. Matvievskaya (textos en árabe y en persa) y por D. A. King (1986) en inglés: este último ha incorporado una impresionante cantidad de materiales nuevos basados en su catalogación sistemática de los manuscritos científicos de la Biblioteca Nacional de El Cairo.

Podría añadir algunos repertorios más, como el elaborado por D. Lamrabet (1994) para los matemáticos y astrónomos magrebíes, pero lo que me interesa hacer constar aquí es que, con algunas excepciones parciales, la bibliografía que he citado tiende a omitir sistemáticamente los materiales de origen turco. Esto resulta particularmente grave dada la existencia, sobre todo en Istambul, de unas importantísimas bibliotecas en las que se conservan varios centenares de miles de manuscritos (no exagero), en turco, árabe y persa, muchos de los cuales son científicos o, más precisamente, astronómicos. Sin una exploración mínimamente superficial de este fondo estamos perdiendo de vista cuatro o cinco siglos de la historia de la astronomía en buena parte del Mediterráneo.

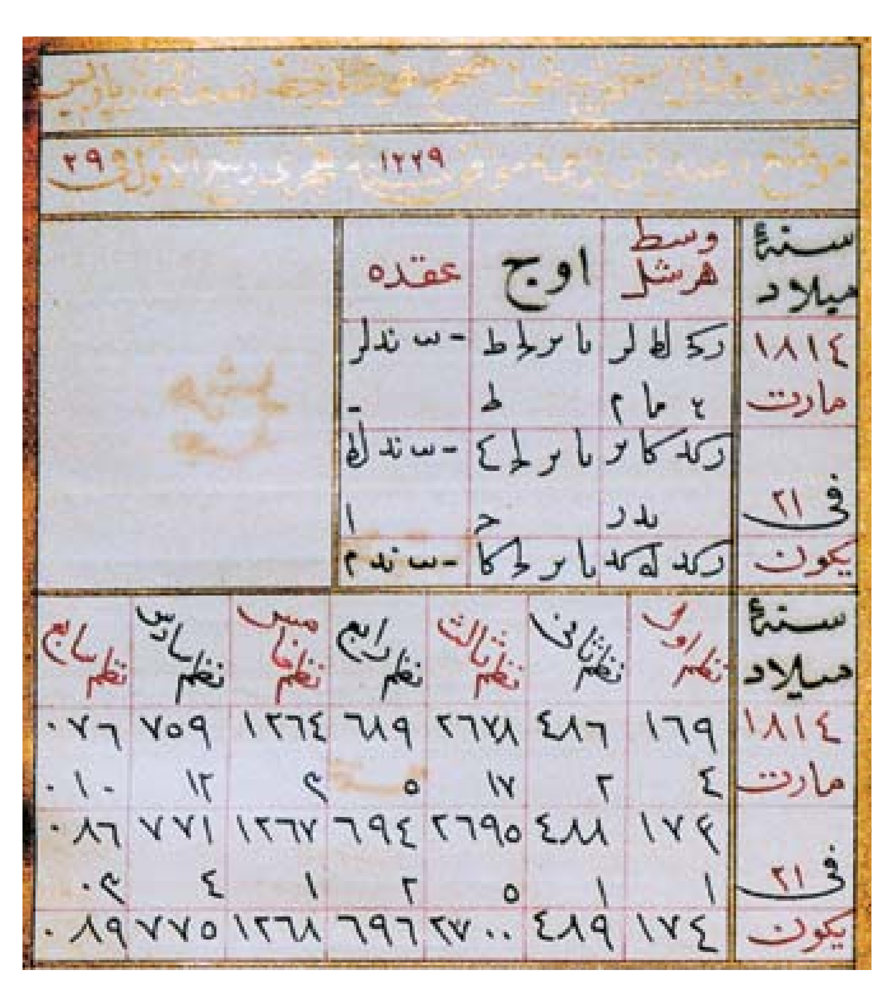
La obra es el resultado de un primer esfuerzo para rellenar este vacío. Tal como se dice en la introducción inglesa, no se trata de una historia de la astronomía oto-

El autor

JULIO SAMSO, catedrático de la Universidad de Barcelona, lleva varios decenios dedicado a la investigación de la historia de la ciencia árabe. De la proyección internacional de sus trabajos nos habla la publicación de *Islamic Astronomy and Medieval Spain* en la selecta colección “Variorum Reprints”.

mana, sino de una primera recopilación de materiales a partir de los cuales se podrá empezar a pensar en escribirla. El libro se compone de una larga introducción sobre la evolución de la astronomía en los períodos pre-otomano y otomano. A esto sigue una colección de fichas biobibliográficas, ordenadas cronológicamente de acuerdo con la fecha, aproximada o exacta, de la muerte de cada autor. Sigue una breve sección que contiene una lista de autores de cronología desconocida. Las fichas contienen datos biográficos (cuando se dispone de ellos), una relación de obras que incluye una idea acerca del contenido de las mismas, una lista de manuscritos (con una breve descripción y datos sobre la fecha de copia) y una bibliografía. Finalmente, una larga sección contiene una lista de obras anónimas clasificadas por materias (obras generales; tablas astronómicas; instrumentos astronómicos; almanaques y efemérides astronómicas anuales) y, dentro de cada grupo, por orden alfabético de títulos. El libro se completa con una bibliografía y unos índices muy elaborados, que abarcan antropónimos, títulos de libros (en caracteres árabes y en caracteres latinos), topónimos, instituciones..., propietarios de los manuscritos, etc.

Para elaborar cada ficha, los autores no se han limitado a despojar sistemáticamente los catálogos de manuscritos de las bibliotecas turcas, sino que han intentado —no siempre con éxito— completarlos recurriendo a las bibliotecas de países árabes, europeos y americanos. La lectura de las mismas nos da una idea bastante aproximada de los centros de interés de los astrónomos reseñados que, por lo menos hasta el siglo XVIII, son los mismos que se constatan para toda la astronomía árabo-islámica en general.



1. TRADUCCION TURCA de las tablas astronómicas de Joseph-Jérôme Lalande realizada en 1826 por Ḥusayn Ḥusnī. Manuscrito TY 6553, fol. 10b, de la Universidad de Istambul.

Instrumental astronómico

Abundan los escritos sobre instrumental astronómico mayormente dedicados a las calculadoras analógicas destinadas a resolver gráficamente problemas de astronomía esférica: astrolabio, cuadrante de senos (escala gráfica de senos y cosenos) y cuadrante de almucantarates (cuadrante astrolábico que se obtiene doblando dos veces una lámina de astrolabio) son los más frecuentes. Conviene señalar que, dentro de esta categoría, aparecen las únicas referencias a instrumental de origen andalusí cuyos ecos llegaron al extremo oriental del Mediterráneo: me refiero a los astrolabios universales que se originaron en Toledo en el siglo XI (azafeas *zarqāliyya* y *shakkāziyya*) e instrumentos derivados de los mismos (el cuadrante *shakkāzī* diseñado por Ibn Ṭībugā en el siglo XIV). A esto hay que añadir instrumentos menos comunes como el círculo indio (para determinar los puntos cardinales), la esfera celeste e incluso el muy poco frecuente astrolabio esférico.

Son escasas las referencias a instrumentos de observación aunque, c. 1502, Ilyā' al-Yahūdī, un judío de Constantinopla, describió, en hebreo, un nuevo instrumento de observación que, en su opinión, era mejor que la esfera armilar de Ptolomeo: el texto hebreo fue traducido al árabe diez años más tarde por ᶜAbd al-Salām al-Muhtadī. Asimismo su contemporáneo Mūsà b. Ibrāhīm al-Ǧaldāwī (m. c. 1520) describe un instrumento, de su propia invención, para observaciones solares que debía de tener una cierta envergadura, ya que se dice que en él intervenía una columna de 6 o 7 codos de altura (entre 3 y 3,5 metros). Las referencias a estos dos instrumentos en el siglo XVI coinciden, cronológicamente, con una etapa en la que los astrónomos turcos están seriamente interesados por la observación.

Ya en el siglo XV dos astrónomos de origen turco —Qāḍizāda al-Rūmī (m. c. 1432) y ᶜAlī b. Muḥam-

mad al-Qushǧī [Kuşçu, en la transcripción utilizada por los autores]—participan en las labores del observatorio de Samarcanda, fundado en 1420 por Ulug Beg (m. 1449). Por otra parte, en 1575 se lleva a cabo un intento fallido de fundar un gran observatorio en Istambul, bajo el patrocinio del sultán Murād III (1574-1595), por iniciativa de Taqī al-Dīn b. Ma[c]rūf b. Aḥmad (1525-1585): por más que este observatorio tuvo una vida efímera (fue destruido en 1580), se ha subrayado la semejanza del instrumental del que disponía con el que utilizaba Tycho Brahe (1546-1601) en el de Uraniborg.

Labor teórica

Aunque no existe, en general, prueba alguna de una relación directa entre observación y los esfuerzos teóricos que realizan los astrónomos musulmanes para crear modelos planetarios que sustituyan a los de Ptolomeo a partir del siglo XIII, es un hecho que buena parte de esta labor teórica la llevan a cabo astrónomos que trabajan en los observatorios de Marāga (s. XIII) y Samarcanda (s. XV). Las preocupaciones de estos astrónomos les conducen a desarrollar una nueva disciplina astronómica (la *hay'a* o cosmología) que diseña modelos compatibles con la física de la época y que, por consiguiente, no son meros artificios matemáticos en dos dimensiones cuya única utilidad sea la de constituir la base que permita elaborar tablas para predecir posiciones planetarias.

A partir de Marāga se elaboran modelos en tres dimensiones con los que se pretende representar una realidad física y en los que se aspira a encontrar alternativas para las incoherencias ptolemaicas que no siempre respetaban el principio básico de justificar los movimientos planetarios mediante una combinación de movimientos circulares y uniformes. Estas preocupaciones son, precisamente, las mismas que tuvo Copérnico, el cual, sin ninguna duda, conoció los modelos surgidos de la escuela de Marāga ya que los mismos reaparecen en el *Commentariolus* y en el *De revolutionibus*.

Ahora bien, hasta hace relativamente poco tiempo, se consideraba que esta labor teórica se llevó a cabo en el siglo XIII (Marāga) y llegó a su cima en el XIV (Ibn al-Shāṭir). La investigación realizada durante los últimos quince años, sobre todo por George Saliba y Jamil Ragep, demuestra que este trabajo continuó entre los siglos XV y XVII y que en él participaron una serie de astrónomos bien reseñados en el libro editado por Ihsanoǧlu: me estoy refiriendo, entre otros, al ya citado al-Qushǧī, a Mīrim Çelebi (m. 1525), nieto tanto de al-Qushǧī como del también citado Qāḍizāda al-Rūmī y a Gars al-Dīn Aḥmad al-Ḥalabī, llamado Ibn al-Naqīb (m. 1563).

Tablas

La astronomía islámica siempre ha sido aficionada al cálculo, razón por la cual, entre la literatura astronómica conservada, se encuentra un número muy elevado de tablas astronómicas que suelen recibir el nombre de *zīǧ*es. La astronomía otomana no constituye una excepción a este respecto por más que, aparentemente, es escaso el número de obras originales que se conservan y lo que abunda, en cambio, son adaptaciones (a las coordenadas de Istambul y de otras grandes ciudades del Imperio) y reelaboraciones de las tablas importantes del pasado. Incluso cuando un *zīǧ* aspira a ser original, el modelo antiguo siempre está presente: así, en el siglo XV, un tal Küçük es autor de un *al-Zīǧ al-Muǧmal* cuyo gran mérito consiste en producir resultados análogos a los del *al-Zīǧ al-Shāmil* de Abū 'l-Wafā' al-Būzǧānī (m. 998) que, en el mismo siglo, había sido objeto de un comentario.

En lo que respecta a las reelaboraciones, los *zīǧ*es más difundidos son los de Naṣīr al-Dīn al-Ṭūsī (1201-1274), Ibn al-Shāṭir (m. 1375) y, sobre todo, de Ulug Beg. Este último *zīǧ*, sin duda el canto del cisne de las tablas astronómicas islámicas, se consideraba aún vigente a fines del siglo XIX, por más que, a partir del siglo XVIII, tiene lugar la introducción en el mundo cultural otomano de la astronomía europea. Este fenómeno tiene un precedente claro a principios del siglo XVI ya que, en 1506, el médico judío Mūsà Ǧālīnūs redacta una recensión abreviada del *Almanach Perpetuum* de Abraham Zacuto (1496). No obstante, esta obra parece haber tenido una repercusión muy escasa y su importancia es mucho menor que la que adquirieron, a partir de la segunda mitad del siglo XVIII, las tablas astronómicas de Jacques Cassini (1677-1756) y las de Joseph-Jérôme Lalande (1732-1807). Las primeras fueron objeto de una versión turca por Jalīfa Zādeh en 1772, quien había traducido, en 1767, la *Théorie de la lune* (S. Petersburgo, 1752) de Alexis-Claude Clairaut (1713-1765).

Las tablas de Cassini fueron objeto de recensiones, también en turco, por Maqāmī Sulaymān (m. c. 1795) y Durakpaça-Zāda (c. 1822-1824) y de una traducción árabe, por [c]Abd Allāh al-Mīqātī (m. c. 1808). Las tablas de Lalande, aparentemente menos difundidas que las de Cassini, fueron traducidas al turco y al árabe en 1826 por Ḥusayn Ḥusnī (m. 1840) y también fueron objeto de una recensión árabe anónima y sin fechar.

A esto conviene añadir la aparición de referencias a obras de divulgación astronómica de Camille Flammarion (1842-1925), de textos sobre el uso de instrumentos modernos como el sextante y el octante en pleno siglo XIX y el tono claramente moderno de los escritos, en árabe, de Maḥmūd Bāshā al-Falakī (m. 1885) cuando habla de la necesidad de fundar un observatorio meteorológico en Egipto, de la orientación astronómica de las pirámides o del eclipse total de sol del 18 de julio de 1860.

Efemérides

Repasar el repertorio de Ihsanoǧlu depara sorpresas como la de comprobar la escasa importancia numérica que tienen los textos astrológicos. Esto se debe, probablemente, al criterio selectivo de los autores a la hora de establecer qué obras merecían el calificativo de "astronómicas", más que

a un abandono de la astrología por parte de los autores otomanos. De hecho encontramos varias referencias a escritos relacionados con la “astrología matemática” (división de casas, proyección de rayos), pronósticos sobre cometas observados o sobre eclipses. Por otra parte, un testimonio muy fiable de la existencia de una práctica astrológica muy viva a lo largo de todo el período nos lo ofrece la enorme cantidad de efemérides planetarias documentadas en manuscritos y, en una última etapa, impresas, en una importantísima colección que abarca desde 1452 hasta 1935.

Estas efemérides no tenían otra aplicación que la astrológica hasta bien entrado el siglo XVIII, en el que empiezan a aparecer las primeras referencias a la astronomía náutica. Esto se ve confirmado en los títulos, que aluden, a veces, al hecho de que las efemérides van acompañadas de predicciones sobre los acontecimientos del año en curso; sólo en alguna rara ocasión, por tratarse de efemérides restringidas al sol y a la luna, puede pensarse en una aplicación calendárica.

Por otra parte, es evidente que calcular unas efemérides implica utilizar unas tablas astronómicas. Sólo un análisis detallado de las efemérides conservadas nos puede dar información fiable acerca de las tablas empleadas con más frecuencia. No obstante, si puede confiarse en las afirmaciones de los propios autores cuando aparecen registradas en el catálogo, parece claro que las tablas más usuales fueron las de Naṣīr al-Dīn al-Ṭūsī (m. 1274) y las de Ulug Beg. Conservamos, no obstante, efemérides para 1836-38 y 1844-45 en las que hay una mención expresa de las tablas de Cassini, combinadas con las de Ulug Beg, y otras para 1840-42 en las que se han utilizado las tablas de Lalande.



2. CUADRANTE cilíndrico otomano del siglo XVIII, en madera y latón.

El *muwaqqit* otomano

Si queremos tener un atisbo de los medios de vida de los astrónomos otomanos deberemos constatar que la práctica de la astrología y la compilación de efemérides debieron constituir dos fuentes de ingresos claros antes de que se fundaran universidades y observatorios. Existe, no obstante, una tercera vía para la profesionalización del astrónomo que es característica del mundo islámico: el desarrollo, a partir del siglo XIII, de la profesión de *muwaqqit*, astrónomo vinculado a una mezquita y cuya función es ocuparse de todos aquellos problemas astronómicos relacionados con el culto religioso y que incluyen cuestiones no siempre sencillas, como la de establecer las condiciones de visibilidad de la luna nueva al principio de cada mes lunar, la fijación de las horas de la oración a lo largo del año solar o el cálculo del acimut de la alquibla que implica establecer, por ejemplo, la orientación hacia La Meca del orante en el momento de realizar la oración.

Si repasamos el repertorio de Ihsanoğlu advertiremos la enorme cantidad de literatura astronómica que se ocupa de tales cuestiones. Resulta interesante, a este respecto, ver cómo, a principios del siglo XVIII, Muḥammad al-Darandī se plantea problemas como el siguiente: a 90º de latitud, lugar donde tanto el día como la noche duran seis meses, ¿cómo se las arreglará el buen musulmán para cumplir con el ayuno de Ramadán, que implica no ingerir alimentos ni agua desde la salida hasta la puesta del sol, y cómo determinará las horas de la oración, que dependen de la longitud de la sombra proyectada por el sol? Del mismo modo Ibn cĀbidīn (m. 1836) interviene, en su calidad de astrónomo, en la polémica suscitada por la visión o no visión, en Damasco, de la luna nueva de Ramadán del año 1240 de la Hégira, que correspondió al 6 de abril de 1825.

Como conclusión, el libro editado por Ihsanoğlu es, sin duda, una obra de primera importancia y de la máxima utilidad para todos aquellos que se interesan por la historia de la astronomía medieval y moderna (a partir del siglo XVIII como pronto en el mundo islámico). Como sospecho que jamás llegaré a ver una traducción inglesa de la obra, he hecho el firme propósito de comprarme un diccionario turco a la primera ocasión. Será la única manera de sacar un poco más de provecho de este libro del que ya he aprendido muchas cosas.

CURIOSIDADES DE LA FÍSICA

Jean-Michel Courty y Édouard Kierlik

Poderes de la inducción

De todos los medios de cocción, el más singular es la placa de inducción, donde el calor se crea directamente en el metal de la cazuela. Este prodigio es resultado de la inducción electromagnética, una de las formas más eficaces de transmitir energía sin contacto.

Situemos un trozo de cobre cerca de un imán. No pasa nada. En cambio, si movemos el cobre con respecto al campo magnético aparecerá en él una corriente eléctrica y se calentará. Este efecto, descubierto por Foucault y Faraday, es el origen de múltiples aplicaciones, entre ellas las placas de inducción y los ralentizadores electromagnéticos.

En un conductor como el cobre una parte de los electrones puede moverse libremente; su movimiento, bajo el efecto de una fuerza, genera corriente eléctrica. Sabemos que los imanes crean campos magnéticos que ejercen sobre las cargas en movimiento una fuerza normal a sus trayectorias, las cuales, en consecuencia, se curvan. Cuando desplazamos el trozo de cobre los electrones sufren ese efecto y les anima un movimiento que llamamos "corriente de Foucault", cuya intensidad es proporcional a la velocidad de desplazamiento del metal y a la amplitud del campo magnético. Dentro del material, donde no hay hilo que las guíe, las corrientes de Foucault siguen recorridos complicados. Sabemos, eso sí, que forman lazos y bucles, y de ahí su otro nombre de "corrientes de remolino".

Transformación de la energía mecánica

Las corrientes de Foucault se manifiestan siempre que un material conductor se mueve dentro de un campo magnético; el desplazamiento las induce. Numerosos dispositivos industriales utilizan esa inducción para transformar la energía mecánica en energía eléctrica y luego quizás en calor.

Todos sacan partido del mismo principio que Léon Foucault puso en práctica en 1855 cuando giró un disco de cobre en el entrehierro de un imán. Puesto que se mueve, ese disco está recorrido por corrientes de Foucault. Tales corrientes inducidas calientan el material que atraviesan porque los electrones que las componen chocan sin cesar con las otras cargas eléctricas del material y les transfieren parte de su energía, que se transforma así en calor. Esa energía procede de la única fuente presente, la persona que acciona el disco. ¡Por eso tenía Foucault que esforzarse en accionar la manivela! Si no se mantiene el movimiento de rotación, toda la energía inicial del disco se transformará en calor y dejará de rotar.

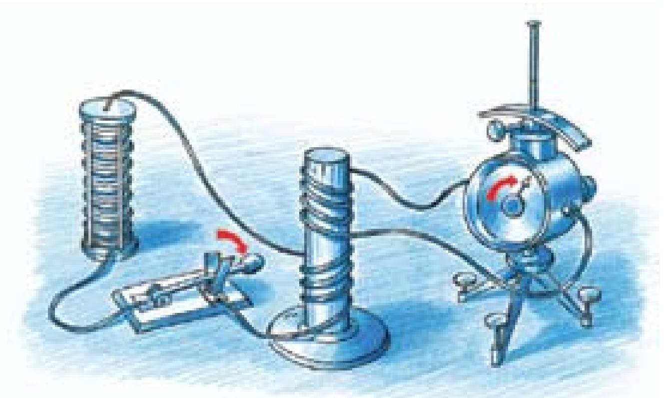
Lo mismo ocurre con los ralentizadores eléctricos de los camiones, un tipo de freno que lleva hoy la mayoría de los vehículos pesados. Su gran ventaja es que funcionan sin contacto y, por tanto, sin desgaste. En estos dispositivos unos discos solidarios del árbol de transmisión giran entre unos electroimanes alimentados por una batería. Para frenar se manda corriente a los electroimanes. Cuanto mayor es la velocidad del vehículo mayor es la rotación de los discos entre los electroimanes y más eficaz el frenado; por eso son ideales para las bajadas. En cambio, su eficacia disminuye cuando la velocidad es pequeña y desaparece en las paradas, razón por la cual hay que instalar también frenos mecánicos para las marchas lentas.

En los trenes de gran velocidad la evacuación del calor generado por los ralentizadores plantea problemas; la potencia de frenado que requieren es tan elevada, que los discos que se podrían albergar en los bogies no resistirían los calentamientos correspondientes. Una solución astuta es conseguir el frenado induciendo corrientes de Foucault directamente en los raíles, que tienen tiempo de enfriarse entre tren y tren.



1. Michael Faraday inventó la dinamo hacia 1831. Para crear una corriente, hacía girar un disco de cobre en el campo magnético que se extiende entre los polos de un imán permanente

Una pregunta nos viene de modo natural a la mente: ¿cómo se aprovechan las corrientes inducidas antes de que se degraden en calor? En el montaje experimental de Foucault basta intercalar el disco en un circuito eléctrico mediante dos contactos, uno cerca del eje y el otro en el borde del disco. La corriente así captada puede entonces alimentar un aparato eléctrico. Idea simple pero prodigiosa, pues así transformamos la energía eléctrica en energía mecánica. Michael Faraday fue el primero, en 1831, en ponerla en práctica gracias a un montaje parecido al de Foucault. Las dinamos de hoy poseen una arquitectura mucho más complicada que la creada por Faraday. Pueden también hacer de frenos y es posible recupe-



2. Dos bobinas arrolladas en torno a un núcleo de hierro se transmiten entre sí campos magnéticos variables. Al accionar el interruptor del circuito alimentado por la pila de la primera bobina, la corriente eléctrica y, por tanto, el campo magnético varían en ambas bobinas; en la segunda se induce una corriente, medida por un amperímetro



3. ¿Trató Faraday de aprovechar las corrientes de Foucault agitando un imán permanente bajo una jarra de hierro para calentarse el té? El método no es muy eficaz, pero el principio vale. Hoy, los dispositivos que calientan por inducción lo hacen por medio de un campo magnético rápidamente variable generado por devanados de cobre

rar la energía eléctrica producida sin que se disipe. Así, en los vehículos eléctricos recargan las baterías de a bordo; en ciertas líneas de metro las corrientes inducidas se reinyectan en la red eléctrica. En las bicicletas las dinamos ejercen también el efecto de frenos. Pero no nos equivoquemos: si nos cuesta más pedalear con una dinamo conectada es por culpa de la fricción mecánica.

Los campos magnéticos giratorios

La dinamo de Faraday está constituida por un conductor que rota en un campo magnético constante. Si invertimos los papeles y hacemos rotar el imán alrededor del material conductor inmóvil recorrerán el conductor las mismas corrientes inducidas. Se trata de la segunda forma de inducción electromagnética, que se manifiesta cada vez que un campo magnético variable en el tiempo baña un material conductor inmóvil. Parece más difícil de interpretar que la primera. En efecto, si el conductor está quieto, también lo estarán sus cargas. Entonces, ¿cómo podrá moverlas una fuerza magnética proporcional a la velocidad? Son las variaciones del campo magnético, no su acción directa, lo que las mueve. La unidad de ambas formas de inducción fue demostrada por el escocés James Clerk Maxwell en 1865; englobó en una teoría electromagnética única los fenómenos eléctricos y magnéticos.

¿Cómo se crea ese campo magnético variable? Bien moviendo un imán de campo magnético constante, bien alimentando un electroimán con una corriente variable. Mucho más eficaz, este segundo medio se emplea en los transformadores, aparatos concebidos para modificar las tensiones eléctricas. Fue el propio Faraday, desde 1831, quien experimentó con su principio colocando dos bobinas de hilo conductor una junto a la otra. La primera, o bobina primaria, se dispone de modo que su eje coincida con el de la segunda, o bobina secundaria. Cuando una corriente alterna alimenta el circuito de la bobina primaria, ésta engendra un campo magnético, variable en el tiempo, en el seno de la bobina secundaria, donde se crea un campo eléctrico y, por tanto, una corriente inducida; la bobina secundaria se comporta así como un generador eléctrico. El cociente de las tensiones en los bornes de las dos bobinas es igual al cociente de sus números de espiras. Ajustando el número de espiras es posible, pues, "transformar" la tensión eléctrica. De esa manera se pasa de los centenares de miles de volt de la corriente que circula por las torres de transporte a los 220 volt caseros.

Como la primera forma de inducción, la inducción magnética por campos variables va también acompañada de desprendimiento de calor. Todos hemos comprobado que un transformador se calienta aunque no alimente a otro aparato. Ello se debe a las corrientes de Foucault que se arremolinan en todas las piezas metálicas que lo componen. Sin embargo, un inconveniente puede trocarse en ventaja, y es que la inducción magnética por campos variables es uno de los medios más eficaces de producir calor. Para ello, basta sustituir la bobina secundaria de un transformador por una masa conductora; las corrientes inducidas la calentarán. Este principio se aprovecha, por medio de bobinas gigantes, en los hornos de inducción de la industria metalúrgica. En ellos se llevan al rojo vivo los lingotes de hierro; incluso se los funde, pues la temperatura sube hasta 1700 ºC.

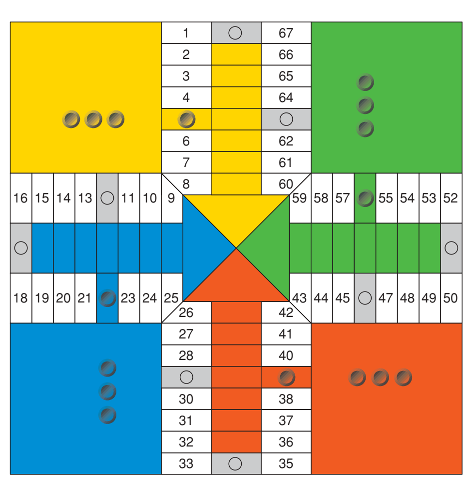
La gran ventaja de los hornos de inducción es que efectúan a voluntad un calentamiento superficial o un calentamiento "en masa", es decir, uniforme y controlado, de todo el material. Viene bien en la cocina esa característica; gracias a ella se obtienen superficies de cocción que se calientan de manera uniforme. Las encimeras inductivas contienen unas espiras de cobre recubiertas por la placa sobre la que se colocan las cazuelas, que han de ser de fondo metálico, preferiblemente grueso. El calor se debe a las corrientes inducidas en el mismo fondo de la cacerola. Como los efectos inductivos serán más importantes cuanto más rápidas sean las variaciones del campo magnético, se emplean campos magnéticos oscilantes de frecuencia de 20 kilohertz, 400 veces mayor que los 50 hertz de la red. El rendimiento de este tipo de dispositivo es excelente: más del 80 por ciento, por menos de un 70 por ciento en general en las placas resistivas clásicas. Además, ni se consume energía ni se produce calor cuando la encimera inductiva está sometida a la tensión eléctrica pero no hay una cacerola sobre ella.

JUEGOS MATEMÁTICOS

Juan M. R. Parrondo

Ventajas engañosas

¿Qué diría usted si en un juego de azar le ofrecieran aumentar las probabilidades de ganar en cada turno? Probablemente pensaría que su oponente ha perdido el juicio. Sin embargo, en ocasiones, lo que en principio parece ventajoso puede ser incluso desfavorable. Recordemos, por ejemplo, las reglas del juego del parchís. Sacar un seis en el dado es muy ventajoso, puesto que avanzamos el mayor número de casillas y además repetimos tirada. No obstante, existe una regla, que podríamos llamar "de compensación", según la cual si se saca seis tres veces consecutivas la última ficha movida vuelve a casa. Si alguien nos ofrece jugar al parchís con un dado trucado, en el que el seis tiene una probabilidad de salir mayor de lo habitual, ¿deberíamos aceptar la oferta, o será preferible jugar con un dado normal? Responder a esta pregunta es bastante complicado. Más adelante haremos un análisis parcial del problema. Veamos antes un juego más simple en el que aumentar las probabilidades de ganar en cada turno da lugar a una disminución de las ganancias.



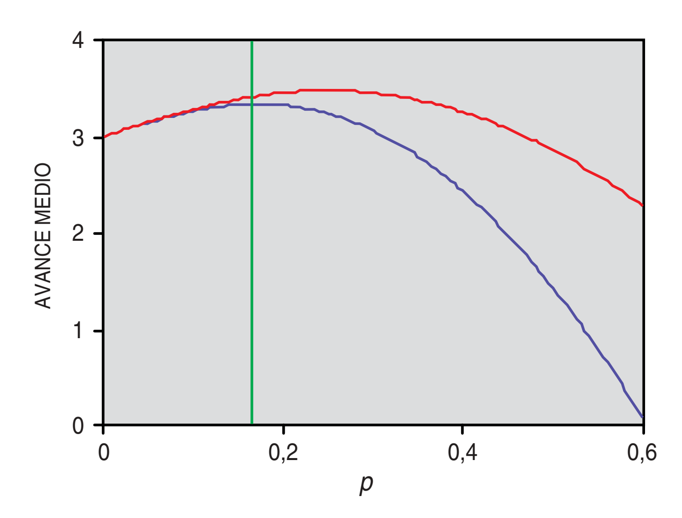
1. En el parchís tres seises nos "devuelven a casa". ¿Merece la pena jugar con un dado trucado en el que el seis sale con mayor probabilidad?

Christian van den Broeck y Bart Cleuren, físicos del Centro Universitario de Limburg, en Bélgica, estudian juegos de este tipo y sistemas físicos y químicos relacionados con ellos, como un conjunto de partículas que, al ser empujadas en un sentido, se mueven en el contrario. Ellos las llaman *donkey particles*, es decir, "partículas burro", aludiendo a la costumbre que estos tozudos animales tienen de moverse siempre en contra de la fuerza que se ejerce sobre ellos. Por extensión, los juegos en los que las ganancias disminuyen cuando se aumentan las probabilidades de ganar en cada turno se llaman *donkey games* o "juegos burro".

Veamos el más simple de esos juegos burro, estrechamente relacionado con la regla del parchís que hemos mencionado antes. Se juega con una moneda en la que sale CARA con probabilidad p y CRUZ con probabilidad $1 - p$. Si al lanzar la moneda sale CARA, entonces el jugador gana un euro. Si sale CRUZ, lo pierde. Pero si sale el mismo resultado dos veces seguidas, se cancela la ganancia o pérdida anterior. Por ejemplo, si obtenemos CRUZ-CARA-CARA-CARA la ganancia final será cero, ya que primero perdemos un euro, luego lo ganamos, en el tercer turno esa ganancia se cancela y, finalmente, en el cuarto volvemos a ganar un euro.

Si la moneda no está trucada, es decir, si p es 1/2, el jugador no tiene ninguna ventaja ni desventaja: el juego es justo y no hay una mayor tendencia a ganar o a perder. Pero, ¿qué ocurre si modificamos p? ¿Qué es más beneficioso para el jugador, que p aumente o que disminuya? Un modo de encontrar la respuesta es realizar una simulación por ordenador del juego para distintos valores de la probabilidad p. Pero también es posible encontrar la solución mediante un argumento matemático. Para ello se requieren algunos conocimientos básicos de matemáticas y un poco de reflexión. En el recuadro se describe este argumento para los lectores interesados. El resultado final se puede ver en la gráfica del recuadro, en la que se muestra la ganancia media en cada turno en función de p. Como cabría esperar, el juego es justo si $p = 1/2$. Lo interesante es que, para p entre 0 y 1/2, la ganancia media es positiva, es decir, el juego es ganador, mientras que para p entre 1/2 y 1 es perdedor. Es decir, si comenzamos con el juego justo, $p = 1/2$, y aumentamos la probabilidad p de ganar en cada turno, lo convertimos en perdedor, mientras que si disminuimos la probabilidad de ganar en cada turno, hacemos que sea ganador. Tenemos por tanto un claro ejemplo de "juego burro", en el que aumentar p es una "ventaja engañosa".

Volvamos a la pregunta de partida acerca de las ventajas de un dado trucado en el parchís. Hacer un análisis completo del juego es muy complicado, ya que habría que tener en cuenta la probabilidad de obtener un 5 para sacar fichas de casa, y otros detalles similares. Para encontrar una respuesta al menos aproximada, he simplificado bastante el problema. Considero un juego parecido al de Van den Broeck y Cleuren: se lanza un dado en el que la probabilidad de que salga un seis es p y la probabilidad de que salga otro número, del uno al cinco, es $(1 - p)/5$. Una ficha avanza tantas casillas como marque el dado. Cuando sale un seis tres veces seguidas la ficha retrocede 36 casillas (el número de casillas de "casa" a "meta" en el parchís es 72, por eso la posición media de una ficha será, aproximadamente, 36). Al calcular el avance medio en una tirada re-



2. Avance medio en cada tirada con un dado trucado (p es la probabilidad de sacar un seis) en un "parchís simplificado"

sulta la curva azul de la figura 2. Si, en lugar de penalizar con 36 casillas los tres seises consecutivos, hacemos que la ficha retroceda 16 casillas, el resultado será el que se muestra en la curva roja. La línea vertical verde indica $p = 1/6$, es decir, el caso de un dado no trucado. Curiosamente, el máximo de la curva azul está muy cerca de este valor $p = 1/6$. Esto nos indica que cualquier desviación con respecto al dado no trucado presenta una desventaja para el jugador, y además esta desventaja es mínima. ¿Es esto una coincidencia o la regla de "volver a casa con tres seises" se diseñó precisamente para cancelar las posibles ventajas o desventajas producidas por dados imperfectos? Me temo que no, puesto que nuestro análisis es bastante simplificado y un estudio más cuidadoso probablemente daría lugar a una gráfica más parecida a la curva roja que a la azul.

Existe un problema clásico relacionado con esta cuestión: ¿cómo puede jugarse con una moneda, de la que se sabe que está trucada pero no cuál es la probabilidad p de que salga CARA, de manera que el jugador pierda o gane en cada turno con una probabilidad ½? Recuerde que no conocemos p; por lo tanto, la solución debe consistir en un procedimiento que nos dé, sea cual sea el valor de p, dos posibles resultados perfectamente equiprobables. La moneda se puede lanzar varias veces por turno. La solución es muy simple y evidente, pero encontrarla no es nada fácil y requiere una considerable dosis de "inspiración". La revelaremos en el próximo número.

El "juego burro" más simple

Supongamos que en el "juego burro" de la moneda anotamos en una pizarra el resultado de las jugadas de cada turno de acuerdo con las reglas siguientes: si la pizarra está vacía, escribimos el resultado del lanzamiento de la moneda; si sale el mismo resultado que está apuntado en la pizarra, la borramos y la dejamos vacía; si sale un resultado distinto, la borramos y escribimos el que ha salido. Es decir, en la pizarra anotamos los últimos resultados que están "pendientes" de consolidarse o de cancelarse. Las reglas establecen que el pago que recibe el jugador en un turno depende de lo que resulte del lanzamiento de la moneda y de lo que esté anotado en la pizarra. La siguiente tabla detalla todas las posibilidades. Hemos indicado también entre paréntesis cómo queda la pizarra tras el turno:

		VALOR ANOTADO EN LA PIZARRA ANTES DE LANZAR		
		NINGUNO	CARA	CRUZ
RESULTADO DE LA TIRADA	CARA	+1 (CARA)	–1 (NINGUNO)	+1 (CARA)
	CRUZ	–1 (CRUZ)	–1 (CRUZ)	+1 (NINGUNO)

En los problemas de probabilidades siempre conviene imaginarse muchos jugadores, cada uno de ellos jugando simultáneamente pero de modo independiente, y cada uno con su moneda y su pizarra. Si tenemos N_0 jugadores en cuya pizarra no hay nada, N_1 jugadores con el valor CARA anotado en ella y N_2 jugadores con el valor CRUZ, ¿qué valores tendrán anotados en el turno siguiente? De los N_0 jugadores con la pizarra vacía, una fracción p sacará CARA y una fracción $1 - p$ sacará CRUZ en el siguiente turno (recordemos que p es la probabilidad de que, al lanzar las monedas, el resultado sea CARA). En ambos casos, estos jugadores anotarán el valor obtenido en su pizarra correspondiente. A su vez, de los N_1 jugadores con CARA en su pizarra, una fracción p sacará CARA en el siguiente turno, y en consecuencia borrará lo escrito, mientras que una fracción $1 - p$ sacará CRUZ y anotará dicho resultado. Por tanto, en el turno siguiente el número de jugadores con la palabra CRUZ escrita en su pizarra será:

$$N'_2 = (1 - p)N_0 + (1 - p)N_1 \qquad (1)$$

Con un argumento idéntico, se puede obtener el número de jugadores con la pizarra vacía:

$$N'_0 = pN_1 + (1 - p)N_2 \qquad (2)$$

y el número de jugadores con la palabra CARA:

$$N'_1 = pN_0 + pN_2 \qquad (3)$$

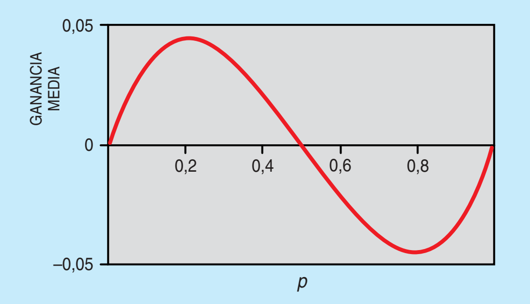
Por otro lado, si conocemos N_0, N_1 y N_2 podremos también saber cuál es la ganancia neta de nuestro conjunto de jugadores. Por ejemplo, los N_1 jugadores en cuyas pizarras está anotado el valor CARA pierden siempre un euro. Lo ganan los N_2 jugadores con CRUZ en sus pizarras. Finalmente, de los N_0 jugadores con la pizarra vacía, pN_0 ganan un euro y $(1 - p)N_0$ lo pierden. Por lo tanto, la ganancia neta en un turno es:

$$G = pN_0 - (1 - p)N_0 - N_1 + N_2 \qquad (4)$$

Cuando se ha jugado un número considerable de turnos, ocurre que N_0, N_1 y N_2 alcanzan unos valores constantes, que también se llaman *estacionarios*. Son valores que tienen la peculiaridad siguiente: si se los introduce en las ecuaciones (1), (2) y (3), los resultados de éstas, es decir, N'_0, N'_1 y N'_2, coinciden exactamente con N_0, N_1 y N_2. Esta peculiaridad nos permite calcular tales valores estacionarios e, introduciéndolos en la ecuación (4), obtener la ganancia neta. El lector interesado podrá comprobar que la ganancia neta por jugador resulta ser:

$$g = \frac{G}{N_0 + N_1 + N_2} = \frac{p(1-p)(1-2p)}{(2-p)(1+p)}$$

tal y como se representa en la gráfica.



Ganancia media en cada turno del "juego burro" (p es la probabilidad de que salga cara en la moneda trucada)

Ideas aplicadas

Mark Fischetti

Toma de imágenes desde aviones y satélites

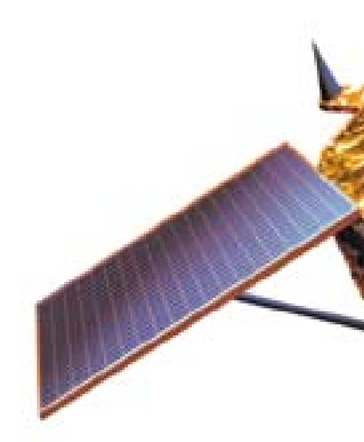
Desde que a Icaro se le fundieron las alas de cera por volar demasiado cerca del sol llevamos queriendo observar a vista de pájaro el mundo que pisamos. Hoy se cuenta con dos procedimientos principales para tomar imágenes desde el cielo. El Laboratorio de Investigaciones Costeras de la Universidad de Nueva Orleáns (*a la derecha*) emplea la fotografía aérea. Un ordenador a bordo de un avión que vuela a 3600 metros se comunica con el Sistema de Posicionamiento Global Diferencial e informa a la cámara de cuándo ha de realizar cada una de las exposiciones traslapadas que se necesitan. En todos los encuadres se marcan la altitud, la latitud y la longitud del avión. La resolución es de un metro.

De vuelta al laboratorio, los técnicos asignan a los encuadres unas coordenadas de latitud, longitud y elevación sacadas de las referencias terrestres del Mapa Geológico de EE.UU. y convierten docenas de tomas en ficheros de ordenador por medio de un escáner. Unos programas rectifican y combinan las superposiciones hasta producir un mosaico uniforme, eliminan con un filtrado los destellos del agua y del sol, y a veces asignan colores conforme a escalas basadas en uno u otro parámetro, en la absorción de luz, por ejemplo. El costo medio de una misión es de 10.000 euros, dice Paul Connor, director de teledetección del laboratorio.

Las mejores imágenes de los satélites comerciales tienen también una resolución de un metro. (Se dice que la de algunos satélites espía militares es de doce o trece centímetros.) El satélite Ikonos, de la empresa Space Imaging (*más a la derecha*), recorre a una altura de 681 km una órbita no muy inclinada con respecto al eje de la Tierra; cada tres días divisa todos los puntos de su superficie. En el suelo, un telescopio digital fabricado por Kodak graba la información en una banda; en bruto, con sus geo-referencias, se la transmite a la central, cercana a Denver, donde se archiva. Para recuperar una de las imágenes cosechadas, con la curvatura terrestre corregida, un técnico introduce la latitud y la longitud correspondientes. Una imagen de encargo puede costar 20.000 euros; las de catálogo sólo unos 700.

La fotografía aérea consigue resoluciones de medio metro si el avión vuela a unos 2000 metros; el inconveniente es que se requieren más imágenes y los gastos suben. Los satélites cuestan millones de euros, pero producen imágenes continuamente. Captan además lugares conflictivos como Afganistán e Irak, donde el vuelo de los aviones no es seguro. Space Imaging ya ha recibido una licencia de explotación de un satélite con una resolución de medio metro. El portavoz Mark Brender informa de que la compañía espera lanzarlo en 2005.

EL MOSAICO AEREO muestra la mengua de tierra firme junto a Nueva Orleáns. Una cámara Leica Wild Heerburg, que toma transparencias en emulsión positiva de 23 × 23 centímetros, fotografió sesenta encuadres traslapados. La imagen final contiene del orden de un gigabyte de información.



COORDENADAS DEL ENCUADRE



MOSAICO

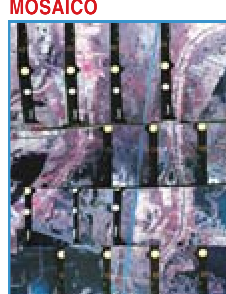
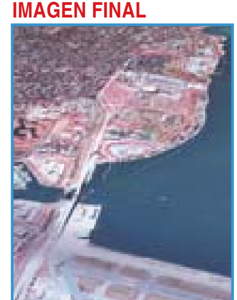


IMAGEN FINAL



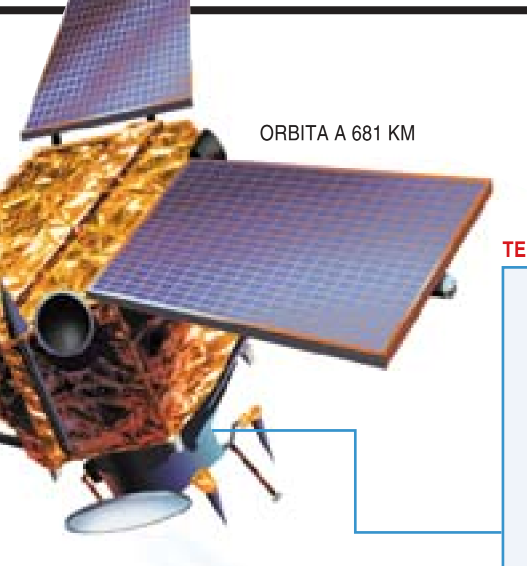
RESOLUCION: 1 METRO

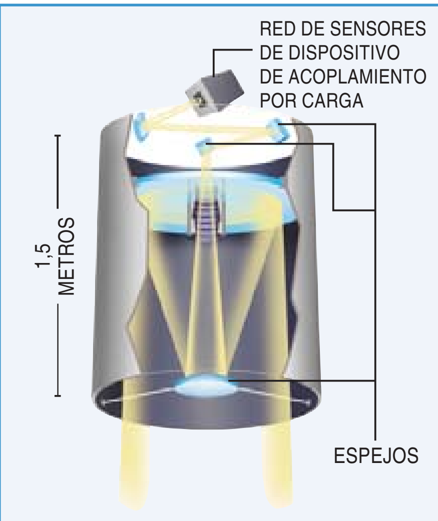
NUEVA ORLEANS

➤ **BAJO CONTROL GRACIAS AL TALONARIO:** El 11 de septiembre Space Imaging poseía el único satélite comercial en órbita capaz de una resolución de un metro. El Pentágono no tardó en concertar una licencia exclusiva de compra de todas sus fotos de Afganistán; según algunos, para impedir que el enemigo y la prensa rastrearan las operaciones militares de EE.UU. En 1996, a petición de Israel, el Congreso añadió a la legislación sobre defensa una disposición que prohíbe a las empresas estadounidenses vender imágenes de un metro de resolución del territorio israelí.

➤ **COLOREADO A CAPAS:** El Landsat 7, el principal instrumento de la NASA para la teledetección, tiene una resolución en color de sólo 15 metros, pero sus siete bandas cromáticas dan unas imágenes muy prácticas y baratas de accidentes del paisaje a gran escala (las líneas costeras, por ejemplo, o la densidad de la vegetación). Los cartógrafos de la Universidad de Nueva Orleáns superponen a veces sus mosaicos aéreos locales de un metro de resolución sobre las fotografías del Landsat y crean unos apasionantes mapas de referencias.

➤ **RENTABILIDAD:** Con las imágenes aéreas y de satélite se puede determinar la calidad de las cosechas, distinguir tanques de vehículos todo terreno, trazar mapas de la erosión, localizar oleoductos, descubrir talas ilegales y medir capas de nieve. Un ejecutivo que quería determinar dónde debía abrir 219 nuevas tiendas encargó a Space Imaging fotos tomadas por satélite de los diez locales más rentables que ya tenía; con ellas pudo comparar los tamaños de sus estacionamientos y su proximidad a las salidas de autopistas, a escuelas y a restaurantes MacDonald. El director de un banco de Bangkok se basó para cerrar 29 sucursales y abrir siete nuevas, no sólo en el valor de las propiedades y en los alquileres de las oficinas, sino en fotografías de ese mismo estilo.





EL SATELITE IKONOS muestra las obras de reparación del Pentágono en noviembre pasado. El ingenio lleva la luz entrante a rebotar entre espejos de manera que se enfoque sobre una densa red de sensores. Para lograr una resolución de un metro, los espejos están pulidos con tal perfección, que si tuvieran un diámetro de 160 km el mayor resalto se levantaría menos de 2 mm. El error de centrado entre los espejos, muy pequeño, se mide en longitudes de onda de la luz. Los miles de píxeles de cristal de cada sensor están cubiertos con 66 capas filtrantes, cada una de ellas de sólo unos angstrom de espesor.

IMAGEN FINAL



RESOLUCION DE 1 METRO

ALTITUD DE 1800 A 3600 METROS

VISTA DE 700 KM

WASHINGTON, D.C.

TALLAHASSEE

LIBROS

De la Filosofía de la ciencia

a la Filosofía de la naturaleza

PHILOSOPHY OF SCIENCE. CONTEMPORARY READINGS. Selección e introducciones de Yuri Balashov y Alex Rosenberg. Routledge; Londres, 2002. **HUMAN SCIENCES. REAPPRAISING THE HUMANITIES THROUGH HISTORY AND PHILOSOPHY,** por Jens Hoyrup. State University of New York Press; Nueva York, 2000. **THOMAS S. KUHN. THE ROAD SINCE STRUCTURE: PHILOSOPHICAL ESSAYS.** Edición preparada por James Conant y John Haugeland. The University of Chicago Press; Chicago, 2000.

CAUSALITY. MODELS, REASONING, AND INFERENCE, por Judea Pearl. Cambridge University Press; Cambridge, 2000. **PHYSICAL CAUSATION,** por Phil Dowe. Cambridge University Press; Cambridge, 2000. **STOCHASTIC CAUSALITY.** Dirigido por Maria Carla Galavotti, Patrick Suppes y Domenico Costantini. CSLI Publications; Stanford, 2001.

***PHILOSOPHIA NATURALIS* 38 (2001)1.** Vittorio Klostermann; Frankfurt.

Se da por descontado que la ciencia, en su historia, es un empeño por arrebatarle parcelas a la filosofía. Con su axiomatización, se repite, Euclides salvó a la geometría de las especulaciones de la Academia platónica. Del "limbo metafísico" sacarían a la física Galileo, Kepler y Newton. Otro tanto haría Darwin con la biología. La propia informática de nuestros días, se apostilla, habría embridado el razonamiento lógico. Aunque la historia de la ciencia contradiga semejante simplificación, la idea persiste arraigada. Para aproximarnos al estado actual de la relación entre ciencia y filosofía podemos valernos de la perspectiva general que se nos ofrece en *Philosophy of Science. Contemporary Readings* y en *Human Sciences*.

Compete a la filosofía ocuparse de las cuestiones cuya resolución escapa a la ciencia y dar cuenta de los límites de ésta. No debieran considerarse temas filosóficos en sentido estricto aquellos problemas que hoy carecen de explicación en el dominio de la ciencia, pero pudieran tenerla en el futuro. Pensemos, entre múltiples ejemplos fronterizos, en el caso del tiempo. De acuerdo con la segunda ley de Newton, fuerza es igual al producto de la masa por la aceleración ($F = ma$). La aceleración es, a su vez, dv/dt, la primera derivada de la velocidad con respecto al tiempo. Si avanzamos, y le preguntamos a un físico qué sea el tiempo, reconocerá que carece de una definición precisa; sin embargo, no podemos cerrarnos a la posibilidad de que los expertos en relatividad progresen en su desentrañamiento. Lo logren o no, parece adecuado no contaminar tal magnitud mensurable con especulaciones ajenas a la física.

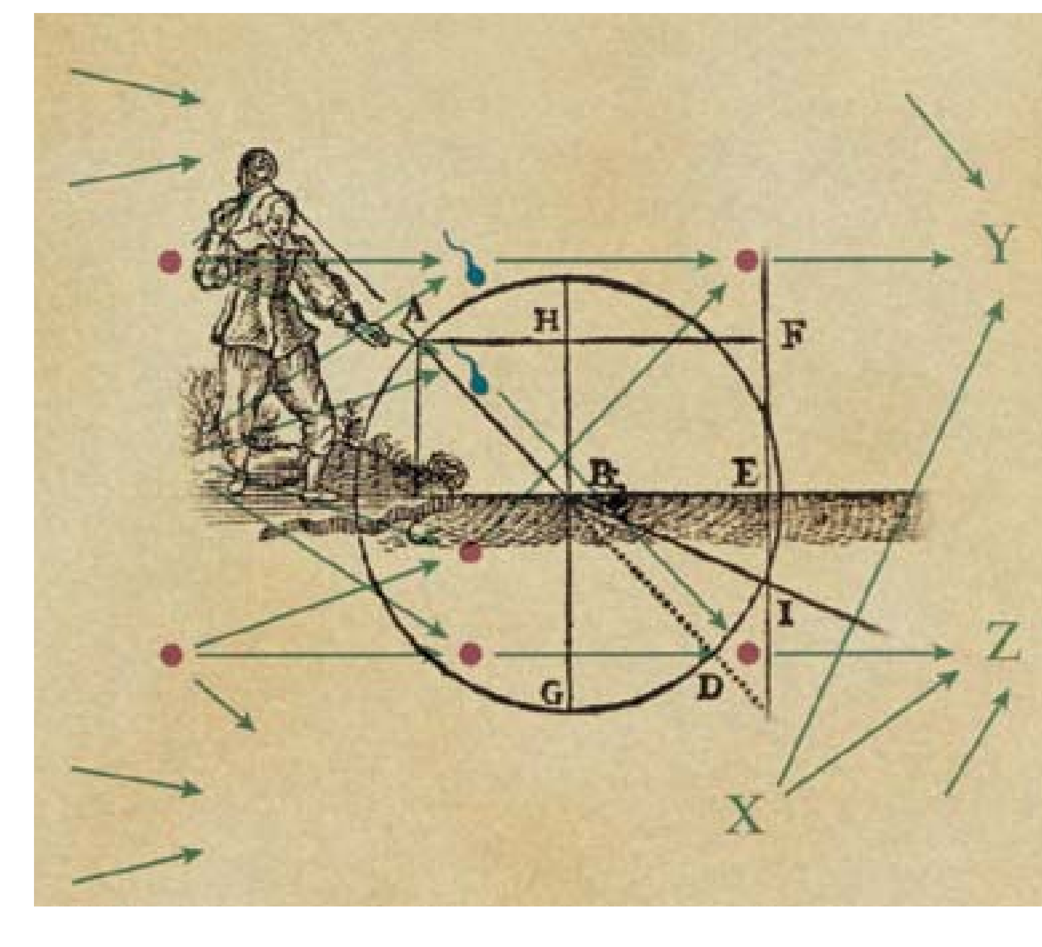
Algunos filósofos confirieron a la ciencia toda posibilidad de conocimiento. En su doctrina, cuanto no cabe en el marco de la demostración empírica carece de sentido. Antes o después, la ciencia, con su método, resolverá todas las cuestiones significativas. Pero al pronunciarse así, están hablando a extramuros de la ciencia. Propio de ésta es fundarse en premisas factuales, no normativas. ¿Cuáles son los factores que la ciencia debe tener en cuenta cuando decide qué cuestiones admiten respuesta, cuáles son las respuestas a esas cuestiones y qué cuestiones carecen de respuesta? De esa gavilla de preguntas, foráneas al quehacer de la ciencia, se ocupa una rama de la filosofía, la llamada epistemología, que estudia la naturaleza, el alcance y la justificación del conocimiento.

Quienes abogaron por atenerse a la demostración empírica, considerando pseudocuestiones los demás ámbitos (excluida la matemática y la lógica), se agruparon en un movimiento muy bien vertebrado e influyente: el Positivismo o Empirismo Lógico. En opinión de Moritz Schlick, uno de sus fundadores, mientras la ciencia persigue la verdad, la filosofía debe ceñirse a acotar el significado de las nociones, los problemas y sus soluciones de la ciencia, mediante las herramientas suministradas por la lógica formal y el recurso al principio de verificación.

Carl Hempel, sistematizador de esta corriente, resumía en dos tipos básicos la explicación científica, uno deductivo-nomológico y otro probabilístico. Para él, una definición explícita aporta las condiciones necesaria y suficiente de existencia de un objeto, acontecimiento, estado o proceso. *Triángulo* queda explícitamente definido si decimos que "es la figura del plano que tiene tres lados". Puesto que las condiciones son en su conjunto suficientes, cualquier figura que las cumpla constituirá un triángulo euclídeo y, puesto que las condiciones son individualmente necesarias, sabemos que aquello que no la satisfaga, no será un triángulo. Tales definiciones eliminan la vaguedad de las descripciones. En su contra tienen que a menudo resulta imposible ofrecer una definición completa, o "explicación", para la mayoría de los conceptos de interés.

Las explicaciones científicas requieren leyes. Las leyes son postulados universales de la forma "todos los A son B" o "si el suceso E ocurre, se produce entonces invariablemente el suceso F". De las leyes deben distinguirse otros enunciados generales accidentales que carecen de fuerza explicativa. Por eso se les ha exigido que, además de su universalidad, respalden los condicionales contrafactuales. (Los contrafactuales no son veritativo-funcionales. Llámase compuesto veritativo-funcional aquel cuyo valor

Representación simbólica de un proceso causal



de verdad está completamente determinado en todo caso posible por los valores de verdad de sus componentes.)

Las leyes se inscriben en una teoría. El modelo ideal de teoría ha venido siendo el sistema axiomático de Euclides. Consta de una serie breve de postulados o axiomas —proposiciones no demostradas en el sistema, aunque admitidas como verdaderas en su seno— y un número extenso de teoremas que se deducen de los axiomas mediante reglas de la lógica. Además de axiomas y teoremas hay definiciones de términos, como el de recta (distancia más corta entre dos puntos) y circunferencia (curva, plana, cerrada, cuyos puntos son equidistantes de otro, que se llama centro, situado en el mismo plano). Las definiciones, por supuesto, emplean términos "primitivos", no definidos en el sistema axiomático, como punto y distancia. Para el empirista lógico Ernest Nagel, en el sistema axiomático que constituye la estructura de una teoría las leyes experimentales son las generalizaciones empíricas sobre observaciones, que pueden derivarse como teoremas y, por tanto, explicarse por los axiomas de la teoría. De esas leyes empíricas distinguía las leyes teoréticas, que implican entidades no observables; unas y otras se expresaban en un vocabulario diferente. Para salvar el hiato entre ambas apeló a "reglas de correspondencia".

El realismo se propuso romper el asfixiante corsé empirista, que exigía una referencia observacional para todos los conceptos de la ciencia. No podemos ver los quarks, objetaba, y, sin embargo, no por ello son menos ciertos, como demuestra su eficacia en la interpretación de la estructura fina de la naturaleza. Súmese a ello que, por muy grande que sea la experiencia y numerosos los experimentos y observaciones, nunca podremos deducir ni siquiera la más sencilla generalización con absoluta necesidad lógica. Cualquiera que sea nuestra familiaridad con objetos dotados de alas, jamás nos sentiremos forzados a inferir de ello el concepto de "ave". Con un listado de descripciones, nunca se alcanza la ciencia, pues de un elenco de datos no emerge teoría alguna.

Muy distinto fue el comportamiento de los instrumentalistas. Tesis muy en boga en los años sesenta, proponía que las teorías científicas constituían herramientas útiles, dispositivos heurísticos, que empleamos para organizar nuestra experiencia, pero no formulan enunciados sobre su verdad o falsedad.

Pero ya Karl Popper había sacudido los cimientos de la doctrina empirista al poner de manifiesto la debilidad del principio de confirmación o verificación. Puesto que las leyes son enunciados sobre números ilimitados de objetos y acontecimientos, no pueden ser verificadas por un número finito de observaciones. Sí, en cambio, pueden ser falsadas por uno solo. Además, la capacidad de ser falsada constituye un criterio o principio de demarcación, facultándonos para distinguir entre teorías genuinamente científicas y pseudocuestiones. Asimismo, se fue viendo con creciente claridad la flaqueza de otro puntal del edificio empirista: la idea de un nivel de observación pura, exento de teoría. La comprobación incluso de la hipótesis más sencilla requiere supuestos auxiliares, es decir, enunciados sobre las condiciones bajo las cuales se contrasta la hipótesis.

Los positivistas aducían que las teorías nuevas y más fundamentales se superponían a las precedentes, al tiempo que ponían de manifiesto que los fenómenos por éstas descritos constituían casos especiales o consecuencias obvias de los procesos explicados por las teorías más profundas. Los axiomas o leyes teoréticas de las teorías antiguas se transformaban en teoremas de la nueva teoría. A ese proceso de sometimiento de una teoría a otra se le llamó "reducción". La reducción de teorías preservaba, además, lo que es correcto en una teoría precedente e identifica así

progreso e historia de la ciencia. De un modo muy distinto opinará Thomas Kuhn (*The Road since Structure: Philosophical Essays*), quien en *The Structure of Scientific Revolutions* propondría otro mecanismo del cambio científico, apuntalado en tres conceptos básicos: paradigma, ciencia normal y revolución. Si la permanencia de un paradigma —de un conocimiento y unas técnicas admitidas— caracteriza a la ciencia normal, la sustitución de un paradigma por otro es el elemento motor de la revolución científica. En la óptica kuhniana, la ciencia deja de ser una pesquisa desinteresada de la verdad, que va acumulando conocimientos en una dirección lineal y guiada por una contrastación observacional inequívoca. En su trayectoria discontinua, a saltos, muestra momentos creadores determinantes de nuevos rumbos.

Con los años, y ante las críticas recibidas de Feyerabend, Popper, Hempel y Charles Taylor, entre otros, sometió a revisión esos conceptos fundamentales, trabajo ahora recogido en *The Road since Structure*, donde ahonda en la comparación entre progreso científico y evolución biológica. Supone ello poner sordina a los bruscos hiatos —las revoluciones— en el curso de la ciencia normal, para admitir períodos de desarrollo dentro de una tradición coherente enriquecidos con fases de "especiación", que se abren en dos líneas de investigación ligeramente distintas. Cabe, por supuesto, la posibilidad de que una de las líneas termine por estancarse y extinguirse.

Sobre todo, reelabora el concepto de inconmensurabilidad entre teorías. Kuhn subraya la diferencia entre lenguajes distintos aunque conmensurables y lenguajes inconmensurables. Entre pares de los primeros se da una traducción perfecta: lo que pueda decirse en un lenguaje puede explicarse en el otro. No cabe traducción posible entre lenguajes inconmensurables; sin embargo, pueden ambos aprenderse. Y puesto que en el ámbito de la ciencia encontramos familias de términos interrelacionados, subraya la importancia de una familia en particular, la de los términos de clase, o "categorías taxonómicas". Estos se disponen siempre en una jerarquía estricta, sometidos al principio de no solapamiento, en virtud del cual dos categorías o clases no pueden tener ejemplos en común, a menos que una de ellas subsuma, entera y necesariamente, a la otra. Las estructuras taxonómicas distintas (las que presenten relaciones de subsunción y de exclusión diferentes) son inconmensurables.



David Hume (1711-1776)

En su estructuración de la filosofía de la ciencia, los empiristas lógicos se habían rebelado contra la identificación entre explicación científica y explicación causal de un fenómeno (*Causality*, *Physical Causation* y *Stochastic Causality*). En su rechazo del concepto de causa se sentían avalados por el nuevo planteamiento indeterminista de la mecánica cuántica. Y repetían el dictum de Bertrand Russell en 1913: "La ley de la causalidad constituye una reliquia de un tiempo pretérito, que sólo sobrevive, lo mismo que la monarquía, porque se supone, a mi parecer erróneamente, que no perjudica". Para Russell la causalidad carecía de sentido porque las leyes de la física son simétricas (operan en ambos sentidos), mientras que las relaciones causales son unidireccionales (proceden de la causa al efecto).

Russell atacaba una tradición física que venía de lejos. En los *Discorsi e Dimostrazioni matematiche, intorno a due nuove scienze attenenti alla Mecanica e i Movimenti locali*, advierte Galileo que en toda exposición de un problema físico hemos, primero, de acometer su descripción y, luego, su explicación. El "cómo" precede al "por qué". Además, la descripción debe llevarse a cabo en el lenguaje de la matemática. No preguntes, dice Galileo, si un objeto cae porque es atraído desde abajo o empujado desde arriba; antes bien, pregunta si puedes predecir el tiempo que tarda un objeto en recorrer una corta distancia y de qué modo ese tiempo varía de un objeto a otro conforme cambia el ángulo de la trayectoria. Unos cien años después, el filósofo escocés David Hume proponía en *Treatise of Human Nature* y en *An Enquiry Concerning Human Understanding* que el *por qué* no sólo era segundo al *cómo*, sino que resultaba totalmente superfluo al estar aquél subsumido en éste. Las conexiones causales sólo serían hábitos adquiridos por la mente ante observaciones repetidas. Los conceptos de causa, conexión necesaria y similares no remiten a nada real. Se trata de meras conjunciones constantes, regularidades que no nos permiten inferir una relación de causa a efecto. Que el gallo cante en la amanecida no significa que cause la salida del sol.

La idea de simultaneidad regular halló cauce matemático en los trabajos de Francis Galton. En el marco de sus investigaciones sobre la herencia de la inteligencia, consideró diversas formas de medir la relación entre las propiedades de una clase de individuos u objetos con las propiedades de otra clase de individuos u objetos. Se encontró con el descubrimiento siguiente: si vamos colocando una magnitud en función de otra, con los dos ejes en una escala apropiada, observaremos que la pendiente resultante de la línea más

ajustada presenta ciertas propiedades matemáticas curiosas. La pendiente es 1, si y sólo si una magnitud puede predecir el valor de la otra con precisión; será cero, si y sólo si la predicción no es mejor que el puro azar. Y lo que es más notable: la pendiente es la misma pongamos X en función de Y, o Y en función de X. "Resulta fácil observar —escribía Galton— que la co-relación debe ser la consecuencia de las variaciones de los dos órganos producidas en parte por causas comunes." Su discípulo, Karl Pearson, uno de los fundadores de la estadística moderna, veía en ese hallazgo de la correlación una categoría más amplia que la de causa. Termina por rechazar la existencia de ésta y sustituirla por tablas de contingencia. La descripción de la relación entre dos objetos queda reflejada en las tablas de contingencia.

Pero el propio desarrollo posterior de la estadística hará ver que la relación causal es mucho más difícil de medir que la correlación. La correlación puede estimarse directamente en un solo estudio no controlado, en tanto que la conclusión causal exige experimentos controlados. Resurge el problema de la causalidad, si bien limitado a su significación estadística. El programa sobre la causalidad probabilística comenzó en los años cincuenta con la obra de Hans Reichenbach *The Direction of Time*, seguida en el decenio siguiente por *A Causal Calculus*, de Irving John Good, y, sobre todo, con el *A Probabilistic Theory of Causality,* de Patrick Suppes, publicada en 1970. Los tres abordan la causalidad como una relación estadística, en concreto una relación de "relevancia estadística positiva". En su pretensión de reducir los enunciados causales a enunciados probabilísticos, Suppes aduce que es propio de una causa aumentar la probabilidad de su efecto, sin que exista un tercer suceso que anule o borre esa relación estadística positiva.

Desde entonces se han multiplicado los enfoques. Así, la teoría de los contrafactuales de David Lewis, quien reduce los enunciados causales a enunciados sobre dependencia contrafactual. De acuerdo con dicha teoría, c causa e si c y e se presentan; de no haberse dado c, tampoco habría aparecido e. La expresión contrafactual "de no

Ferrocarriles españoles

LOS CAMINOS DE LA ERA INDUSTRIAL. LA CONSTRUCCIÓN Y FINANCIACIÓN DE LA RED FERROVIARIA CATALANA, 1843-1898, por Pere Pasqual Domenech. Edicions de la Universitat de Barcelona y Fundación de los Ferrocarriles Españoles; Barcelona, 1999.

Como parte de la llamada Revolución Industrial, en el siglo XIX se construyó en el mundo un millón de líneas de ferrocarril, de ellas, 11.000 en toda España y 1400 en Cataluña.

Los "caminos de hierro" catalanes revisten interés. Salvo la línea Lérida-Reus-Tarragona, que se levantó con fondos franceses, se financiaron con capitales autóctonos. Fue provechosa su construcción y ruinosa su explotación. Se constituyeron hasta una veintena de compañías: algunas nada construyeron pero otras sí que lo hicieron, sorteando escollos de toda índole. Estas fueron fusionándose entre sí, de grado o por fuerza, con el fin de sobrevivir. Pero en el último cuarto de siglo, las cuatro supervivientes fueron absorbidas por las dos grandes compañías españolas (Norte y MZA, en realidad más francesas que españolas).

Hubo un impulso inicial desde 1843, que obedeció a la equivocada idea, muy extendida entonces, de que los ferrocarriles, por sí solos, podían ser el motor del desarrollo económico. Era una idea equivocada, pues las mejoras del transporte, pese a los grandes incrementos que reportan en la utilidad de los bienes, no constituyen una actividad directamente productiva. Por el mero hecho de tener ferrocarril, ningún país se convierte en país rico. Ni la atrasada España decimonónica ni su región más avanzada, Cataluña, fueron excepción.

La construcción de los caminos de hierro exigió ingentes empeños financieros, técnicos y laborales. Los aspectos financieros en la Cataluña de la segunda mitad del siglo XIX son los que estudia nuestro autor, con un manejo minuciosísimo de las fuentes.

Lo que nos cuenta tuvo un desenlace agridulce. Los ferrocarriles catalanes acabaron todos descatalanizados. Y ello a pesar de que desde un principio hubo un afán grande de que se construyesen con capitales propios y permanecieran en manos catalanas. No fue posible. ¿Por qué? Quizá se debiera a que en una Cataluña en vías de industrialización el ferrocarril no era negocio. Pero tampoco la pluralidad de empresas ferroviarias, de escaso tamaño, facilitaba las economías de escala y de alcance. El minifundismo empresarial de Cataluña se dejó sentir en esta esfera.

En el libro se siguen, casi con angustia, las dificilísimas peripecias financieras, excelentemente descritas, de los promotores ferroviarios catalanes, muchos de ellos esforzados empresarios, aunque no faltara algún que otro aprovechado, con el resultado descrito. Resultado que en perspectiva histórica no fue malo para Cataluña, que contó en buena parte de su territorio con una red ferroviaria aceptable.

¿Ayudó o perjudicó a Cataluña en sus afanes ferroviarios formar parte de España? Recibió subvenciones públicas, aunque con cicatería, que no fueron suficientes para completar cabalmente los apoyos locales, no siempre entusiastas. Quizás el buen sentido del catalán le hizo desconfiar de las miríficas promesas en este particular. Accionistas y obligacionistas, que casi siempre perdieron buena parte de sus inversiones en ferrocarriles, no fueron así, a lo que parece, muy numerosos. Con todo, la absorción final por las empresas franco-españolas permitió recuperar algunos fondos y mantener el servicio.

Aunque Jordi Nadal, en el prólogo, lo explica por limitaciones editoriales, resulta sorprendente la ausencia de un índice onomástico de personajes y autores citados, numerosísimos unos y otros, tanto en las 500 apretadas páginas como en las 1700 notas. También falta un índice de los 165 cuadros, 11 gráficos y 6 mapas. No hay un capítulo de conclusiones. Una lectura atenta y sistemática resulta así laboriosa y mucho me temo que esta obra tan notable de historia económica sólo la leamos los historiadores económicos.

—FRANCISCO BUSTELO



Thomas Kuhn (1922-1996)

haberse dado *c*, tampoco habría aparecido *e*" es verdadera si un mundo posible donde *c* y *e* no ocurrieran se aproximara más al mundo real que cualquier otro mundo posible donde *c* no acontece pero sí ocurre *e*. Este contrafactual expresa una dependencia de *e* respecto de *c*; a tal relación la llama Lewis "dependencia contrafactual."

Por su parte, las teorías de transferencia sobre la causalidad sostienen que una causa transfiere energía, o algo similar, a su efecto; ello requiere que se produzca un cambio no natural en el efecto, que causa y efecto se hallen en conexión y que se dé una transferencia de magnitud (velocidad, momento, energía cinética, calor, etc.). No menor influjo ha ejercido la teoría propuesta por Wesley Salmon en *Scientific Explanation and the Causal Structure of the World*. Entiende la causalidad como una propiedad de los procesos, no una relación entre sucesos. Para Salmon un proceso es algo que despliega consistencia de estructura en el curso del tiempo; un proceso causal es la entidad continua espacio-temporal que tiene capacidad para transmitir información, estructura e influencia causal. La teoría consta de dos elementos: la producción y la propagación de la influencia causal.

En el libro de cabecera, Dowe defiende una variante de la teoría de Salmon. La llama teoría de la magnitud conservada, porque lo que convierte en causal a un proceso es la posesión de dicha magnitud. (Una magnitud conservada es cualquier magnitud que está gobernada por una ley de conservación, como la de masa-energía, momento lineal y carga.) En cuanto vincula la causalidad a magnitudes, esta exposición guarda cierta similitud con la teoría de transferencia. La teoría de la cantidad conservada puede expresarse en dos proposiciones: un proceso causal es una línea del mundo de un objeto que posee una magnitud conservada; una interacción causal es la intersección de líneas del mundo que implica intercambio de una magnitud conservada. Por línea del mundo Dowe entiende el conjunto de puntos en un diagrama de espacio-tiempo (Minkowski) que representa la historia de un objeto.

Por su lado, en una presentación de la causalidad mediante combinación de ecuaciones y grafos, Pearl se libera de su pasado empirista y acepta que las relaciones probabilísticas son bloques de construcción fundamentales de la realidad física y de la comprensión humana de esa realidad. Para su desarrollo se apoya en la idea de interferencia o manipulabilidad: al modificar una propiedad se inducen cambios en otra.

Pero, a la postre, lo que el positivismo lógico vindicaba era la muerte de la filosofía de la naturaleza. Sobre la realidad del mundo, era su apotegma, no cabía más que ciencia. De un tiempo a esta parte, sin embargo, ha empezado un movimiento creciente en apoyo de una aproximación filosófica a la naturaleza. Encontramos las grandes líneas de esa corriente en un artículo de Evandro Agazzi publicado en un número reciente de la revista *Philosophia Naturalis*. No se trata de restablecer sistemas pretéritos, del tipo de la *Naturphilosophie* romántica, sino de esbozar una filosofía de la naturaleza que, lejos de desviarse de la ciencia, sea complementaria con ella. Que se consagre a reflexiones específicamente filosóficas sin dejar de asumir lo que la ciencia nos enseña.

¿De qué tipo serían esas reflexiones? Un punto de partida no sería el mero sentido común, sino el famoso *Scholium Generale* que Newton añadió al final de su segunda edición de los *Principia*. Serviría para adentrarse, de un modo general, en los resultados de la ciencia, en un horizonte mucho más dilatado que el de cada disciplina por separado. Ello exigiría una suerte de retroalimentación entre conocimiento científico y reflexión filosófica de la naturaleza, una relación mutua que fue muy activa en el pasado y que no ha cesado de manifestarse en nuestros días.

En la versión de Agazzi se trataría de plantearse una problematización *del todo*, valiéndose de herramientas exclusivas de la experiencia y la argumentación lógica. Cada disciplina científica está caracterizada por su propio todo, o "dominio de objetos", que puede también considerarse su "dominio de discurso", y ese todo nunca es realidad en sí mismo o en cuanto tal, sino realidad considerada bajo un específico punto de vista. Este punto de vista se halla representado (en su vertiente referencial) por un dominio específico de atributos que se toman en consideración, al cual corresponde (en su vertiente conceptual y lingüística) un conjunto específico de conceptos y predicados que circuns-

Técnica y vida

MEANING IN TECHNOLOGY, por Arnold Pacey. The MIT Press; Cambridge, Massachusetts, 1999.

Es éste el cuarto libro que Arnold Pacey escribe desde 1983 acerca de la técnica considerada en sí misma como consecuencia de un desarrollo humanístico en el sentido más amplio; es decir, no vista como motor de ese desarrollo, sino hasta cierto punto al contrario. Así, en sus obras anteriores se ocupaba del papel que las ideas y los ideales representaron en la creación de la técnica y de las complejas influencias cruzadas de naturaleza política, cultural, política y científica que intervinieron en el rumbo de la técnica. En este libro desarrolla el modo en que un sentido del propósito, o de la intención, y de significado de la vida, innato en los individuos, puede afectar a la conformación y uso de la técnica.



Rompiendo la barrera del sonido

Argumentando que en la técnica no caben jerarquías de significado, rechaza el reduccionismo para interpretarla en un contexto humano y admite el papel de la experiencia humana respecto a sus propias ansias. Por tanto, si bien admite que no es posible dejar de lado la historia "objetiva" de la técnica, el libro se centra en la interpretación de la historia de la técnica como campo donde intervinieron y dieron un resultado los deseos, ambiciones y relaciones humanas a lo largo del tiempo. Ello en contraste con la visión de otros historiadores más interesados en los "modelos causales" que, según opina Pacey, se enzarzan en debates estériles acerca de las causas de la revolución industrial, o bien se interrogan sobre lo que determina los cambios sociales o si existe un determinismo tecnológico subyacente.

Un primer objetivo que se fija Pacey es ocuparse del modo en que distintos individuos (sean matemáticos o ingenieros, profesionales o consumidores, hombres o mujeres) viven la técnica como experiencia personal y confirmar la importancia del reconocimiento de esa experiencia. El segundo objetivo es considerar las maneras de analizar esas experiencias personales, sin degradarlas con comentarios sobre lo "puramente subjetivo", para lo cual se vale con reticencias de cierta terminología psicológica y de otra original suya que presentó en una obra anterior (*The Culture of Tecnology*).

Organiza el libro en dos partes. Dedica la primera a la experiencia directa de la técnica, para tratar de la música, como fuente de técnica, del pensamiento visual, del conocimiento táctil y de la generación de significados sociales. En la segunda parte examina los contextos en que se usa la técnica, relacionándola con la naturaleza y la sociedad. Pacey reconoce que no puede evitar tantear en la filosofía de la técnica y echar mano de las hipótesis acerca del mundo y de la naturaleza en que aquélla se basa, lo cual supone plantearse preguntas relativas a los modelos básicos, o paradigmas, que se emplean al tratar de la esencia de la técnica.

Las referencias a las cuestiones sobre los paradigmas aparecen repartidas a lo largo del libro. Por ejemplo, ¿debemos considerar a los hombres como diferenciados de la naturaleza y dominándola como sus gestores, o bien debemos entender que son una parte más de ella y que deben adecuar sus aspiraciones a lo que la naturaleza pueda admitir? Y asimismo, ¿hemos de ver a los hombres como también diferenciados de sus propios sistemas tecnológicos? Si la respuesta es afirmativa, el sistema tecnológico ideal sería aquel tan perfectamente automático que funcionase sin nadie que lo atendiese. Si la respuesta es negativa, los humanos participarían en los sistemas tecnológicos, aun en los más avanzados, y lo lógico sería pensar en una técnica centrada en las personas.

He aquí una dualidad que plantea un dilema que Pacey trata de resolver concluyendo el libro con una tercera parte en la que discute las posibilidades de una técnica más centrada en las personas, merced a una experiencia de la técnica participativa y ética que valore a las personas tanto como a su entorno.

—JOSÉ VILARDELL

criben el dominio del discurso de la ciencia particular. Por ejemplo, podemos considerar la mecánica como la ciencia que estudia la realidad sólo desde el punto de vista de la materia y el movimiento. Aporta a estos atributos un significado especial a través de los conceptos y predicados de masa, espacio, tiempo y fuerza. Con estos predicados se relacionan ciertas operaciones básicas que permiten enlazarlos con los referentes; se trata en particular de operaciones de medición que contribuyen esencialmente a la delimitación del todo de la mecánica.

Por tanto, el todo de una ciencia particular permanece siempre un todo parcial, en el que no están incluidos muchos aspectos de la realidad. Dentro de la misma física encontramos una pluralidad de esos todos parciales (el todo de la mecánica, de la electrodinámica, de la física de partículas, etc.). Aunados, hablaríamos del "todo de la física", una suerte de horizonte global en el que tales todos podrían recibir una unidad sistemática. Hay otros todos parciales además del de la física: el todo de la química, de la biología, etcétera. Podemos ensanchar nuestra perspectiva e incluir todas las ciencias empíricas, obteniendo así el "todo de la ciencia". Ahora bien, ¿es ése un todo, que podríamos denominar el todo de experiencia, equivalente al todo en cuanto tal? La filosofía de la naturaleza, como empresa cognitiva, puede considerarse el esfuerzo por responder a esa cuestión, y puede intentar hacerlo buscando conceptos y principios que, aunque aplicables también a todos los aspectos empíricamente detectables de realidad, no está *limitada* en principio a esa actividad.

—LUIS ALONSO

AVENTURAS PROBLEMÁTICAS

Dennis E. Shasha

Testigos tornadizos

El detective fue derecho al grano y formuló su problema: "Tenemos cinco testigos, que no nos merecen confianza. Le han seguido los pasos a un grupo de 10 presuntos camellos. Para cada sospechoso, los testigos han votado si trafica o no.

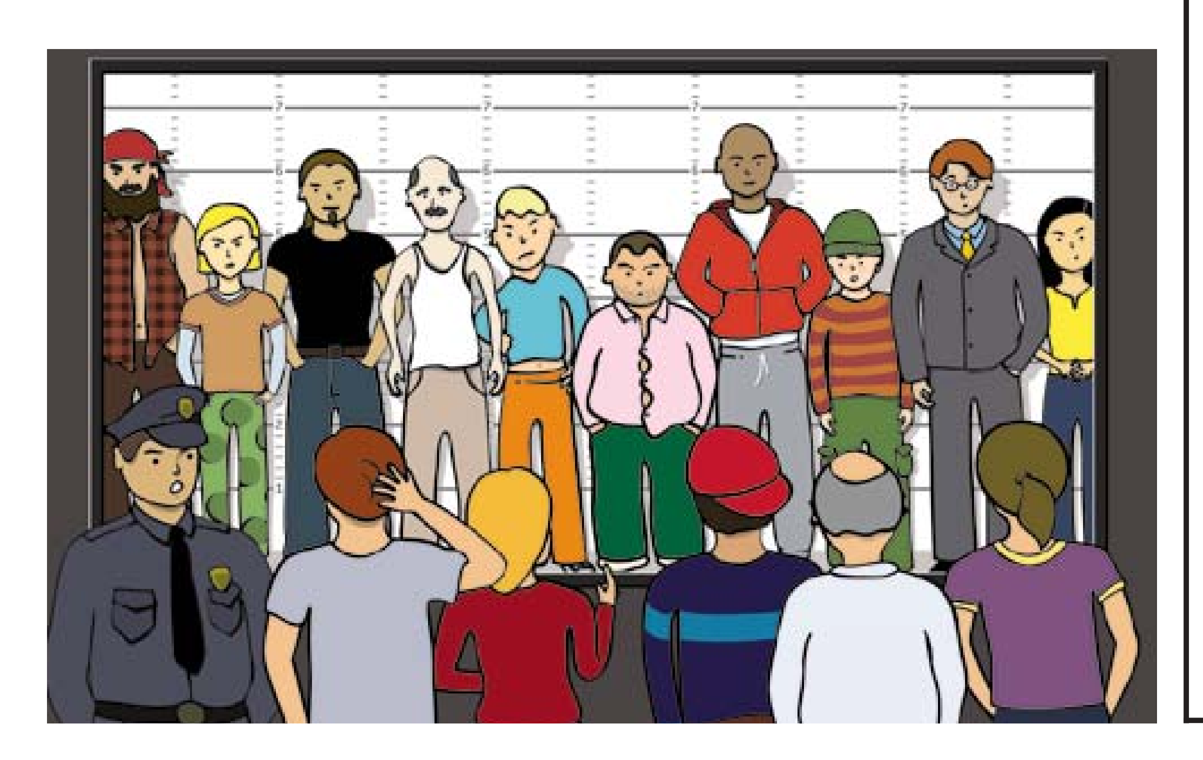
"He aquí un resumen de sus votaciones:

Sospechoso 1: Los cinco han votado que el sospechoso *trafica* con drogas.
Sospechoso 2: Los cinco han votado que *no trafica*.
Sospechoso 3: Tres han votado que *no trafica*; dos, que *sí* lo hace.
Sospechoso 4: Los cinco han votado que *trafica* con drogas.
Sospechoso 5: Cuatro han votado que *trafica*; uno, que *no*.
Sospechoso 6: Los cinco han votado que *no trafica*.
Sospechoso 7: Tres han votado que *trafica*; dos, que *no* lo hace.
Sospechoso 8: Los cinco han votado que *trafica*.
Sospechoso 9: Los cinco han votado que *no trafica*.
Sospechoso 10: Cuatro han votado que *no trafica*; uno, que *sí* lo hace.

"¿Podría usted decirnos quiénes son los sospechosos que sí trafican, sabiendo tan sólo que el número total de mentiras de los testigos es exactamente nueve, y que en la mayoría de estas mentiras se afirma 'que no trafica', cuando la verdad es 'que sí trafica'? Los testigos —concluyó malhumorado el policía— son una pandilla de corruptos."

Como ejercicio preliminar: ¿Cuál es el número mínimo posible de mentiras?

Solución del ejercicio preliminar: Toda votación no unánime (en la que haya disensiones) tiene que corresponder a un número de mentiras igual, por lo menos, a la opinión minoritaria, y tal vez a la mayoritaria. Como podemos observar, se producen disensiones en cuatro casos. El de tres contra dos aparece dos veces, y el de cuatro contra uno, otras dos. Al sumar los votos minoritarios obtenemos un mínimo de seis mentiras.



Solución del problema del mes pasado:

Cinco batidores son suficientes si la disposición de los siete iglúes del centro de investigación corresponde a un grafo planar. La razón es que en todo grafo planar hay al menos un nodo que tiene, como máximo, cuatro vecinos (si desea una explicación detallada, visite la página www.investigacionyciencia.es en la Red).
La solución del segundo problema, donde hay 100 iglúes dispuestos en una retícula rectangular, depende de las dimensiones de ésta. El caso más desfavorable corresponde al cuadrado de lado 10; para explorar esta formación son necesarios 11 batidores. En un rectángulo de m-por-n cualquiera (siendo m menor o igual que n), son necesarios $m + 1$ batidores. Comienzan éstos en las m posiciones situadas en el lado izquierdo del rectángulo, con dos en el ángulo inferior izquierdo. Estos dos batidores se desplazan hasta el iglú situado a su derecha; después, uno se retira hasta el segundo iglú de la izquierda, contando desde abajo, y se repite el proceso.

Solución en la Red

Se puede ver la solució del problema de este mes visitando www.investigacionyciencia.es.

Seguiremos explorando los campos del conocimiento



EL COMPUTADOR MUNDIAL, por David P. Anderson y John Kubiatowicz

Un sistema operativo que cubriese la Internet entera nos brindaría la potencia de los millones de ordenadores personales conectados a ella.

LA LUCHA CONTRA EL CARBUNCO, por John A. T. Young y R. John Collier

Las últimas investigaciones apuntan estrategias nuevas para mejorar la prevención y el tratamiento del carbunco. Tiene prioridad la neutralización de la mortífera toxina de su bacteria.

INVENTARIO COSMICO, por Günther Hasinger y Roberto Gilli

Una inspección cósmica da a entender que el inventario de los objetos luminosos de los cielos quizá se complete muy pronto.

NEUROBIOLOGIA DEL MALTRATO A LA INFANCIA, por Martin H. Teicher

El maltrato a los niños de corta edad puede acarrear efectos negativos permanentes sobre el desarrollo y las funciones del cerebro infantil.

IMPACTOS REPETIDOS, por Luann Becker

¿Sufrió nuestro planeta impactos extraterrestres capaces de producir extinciones en masa no una, sino dos o incluso varias veces?

LA BIODIVERSIDAD BRASILEÑA, AMENAZADA, por Marcelo Tabarelli, Joelma de Fátima Marins y José M.ª Cardoso da Silva

Brasil se encuentra entre los cinco países con mayor número de especies de plantas, aves y mamíferos en peligro de extinción.

SATELITES, CLIMA Y GLACIARES, por Carmelo Alonso Jiménez y Victoriano Moreno Burgos

Los satélites de observación de la Tierra constituyen una valiosa herramienta para el conocimiento de los fenómenos dinámicos que gobiernan el ambiente.

